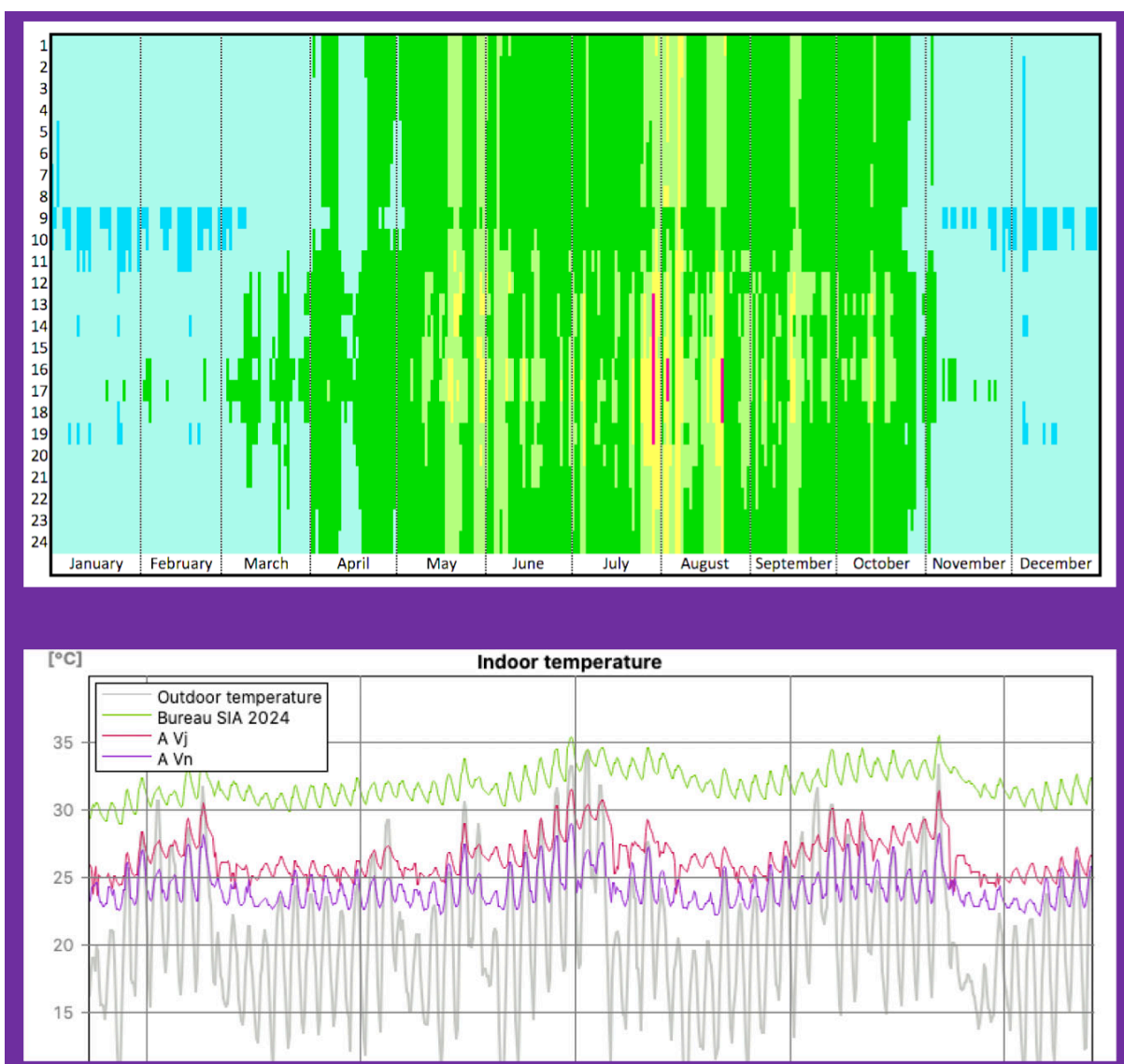




Rapport Final 31 Août 2020

COOLINGVENT - Refroidissement par ventilation pour les bâtiments à basse consommation

IEA EBC Annex 62 on Ventilative cooling



En haut, le diagramme du temps représente le confort selon EN 13251 pour un bureau ventilé naturellement pendant le jour. Le graphique du bas montre qu'une stratégie de ventilation nocturne (courbe bleu) assure parfaitement le confort et rendrait le graphique du haut parfaitement vert. La courbe verte montre qu'un bureau sans fenêtre ouvrable et ventilé uniquement mécaniquement sans climatisation surchauffe pendant toute la période estivale.



Date : 31 Août 2020

Lieu : Lausanne

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Énergie dans les bâtiments
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :

Office Cantonal de l'Énergie, Rue du Puits-Saint-Pierre 4, CH-1211 Genève

Mandataires :

Estia SA
EPFL innovation Park, CH-1015 Lausanne
www.estia.ch

Auteurs :

Flourentzos Flourentzou, Estia SA, flourentzou@estia.ch
Jérôme Bonvin, Estia SA, bonvin@estia.ch

Responsable de domaine de l'OFEN : Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN : Rolf Moser, moser@enerconom.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501297-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch



Abstract

Le refroidissement par ventilation constitue une des réponses possibles à l'augmentation des besoins de refroidissement des bâtiments administratifs et scolaires. Ce rapport propose une série d'indicateurs qui permettent d'évaluer les performances et les risques de cette stratégie passive dans le nouveau contexte de bâtiments isolés de basse consommation et les comparer avec les performances d'une climatisation conventionnelle. Une analyse de sensibilité quantifie les principaux paramètres d'influence : la protection solaire, les gains internes, la stratégie de ventilation, la masse thermique et le climat extérieur. Dans le climat Suisse le refroidissement par ventilation naturelle reste toujours la seule stratégie réellement « Nette Énergie Zéro » pour apporter un confort suffisant. Les résultats des simulations montrent que les SEERVC (pour System Energy Efficiency Ratio – Ventilative Cooling) de la surventilation mécanique peut être plus faible que les climatiseurs conventionnels, ce qui devrait mettre en garde les concepteurs de ces systèmes et qui montre le besoin de bien maîtriser et promouvoir de préférence la ventilation naturelle où c'est possible. L'analyse de sensibilité montre aussi le comportement thermique et les performances énergétiques d'un bâtiment de référence sous l'influence de l'îlot de chaleur en environnement urbain, sous l'influence des vagues de chaleur et du changement climatique. Les résultats montrent qu'un bâtiment bien conçu avec une stratégie de ventilation naturelle contrôlée est résilient aux trois phénomènes.

Zusammenfassung

Die Luftkühlung ist eine der möglichen Antworten auf den steigenden Kühlbedarf bei Verwaltungs- und Schulgebäuden. In diesem Bericht wird eine Reihe von Indikatoren vorgeschlagen, welche eine Beurteilung von Wirksamkeit und Risiken dieser passiven Strategie bei hochgedämmten Niedrigenergie-Gebäuden erlaubt und sie mit einer herkömmlichen Kälteanlage vergleicht. Eine Sensitivitätsanalyse quantifiziert die wichtigsten Einflussfaktoren, wie Sonnenschutz, interne Gewinne, Lüftungsstrategie, thermische Masse und Aussenklima. Im Schweizer Klima ist die natürliche (Fenster-) Lüftungskühlung nach wie vor die einzige "Netto Null Energie"-Strategie, die für ausreichenden Komfort sorgt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der SEERVC (System Energy Efficiency Ratio – Ventilative Cooling) bei zu hoher Luftwechselrate niedriger sein kann als bei konventionellen Klimaanlage. Dies ist ein wichtiger Planungshinweis für die Auslegung solcher Systeme und zeigt, dass sorgfältige Planung erforderlich ist und natürliche Lüftung nach Möglichkeit vorzuziehen ist. Die Sensitivitätsanalyse zeigt auch das thermische Verhalten und den Energiebedarf eines Referenzgebäudes während einer Hitzewelle und unter dem Einfluss von Wärmeinsel-Effekten und Klimawandel. Die Ergebnisse zeigen, dass ein gut geplantes Gebäude mit einer kontrollierten natürlichen Lüftungsstrategie gegenüber allen drei Phänomenen widerstandsfähig ist.

Abstract

Ventilative cooling is one of the possible answers to the increasing cooling needs of office and school buildings. This report proposes a series of indicators to assess the performance and risks of this passive strategy in the new context of low-energy insulated buildings and compare them with the performance of conventional air conditioning. A sensitivity analysis quantifies the main influencing parameters: solar protection, internal gains, ventilation strategy, thermal mass, outdoor climate. In the Swiss climate, ventilation cooling with natural ventilation is still the only truly "Net Zero Energy" strategy to provide sufficient comfort. Simulation results show that the SEERVC (System Energy Efficiency Ratio - Ventilative Cooling) of mechanical over-ventilation can be lower than SEER of conventional air conditioners. This should be a warning to the designers of these systems and shows the need to control and preferably promote natural ventilation where possible. The sensitivity analysis also shows the thermal behavior and energy performance of a reference building under the influence of the heat island in an urban environment, under the influence of heat waves and climate change. The results show that a well-designed building with a controlled natural ventilation cooling strategy is resilient to all three phenomena.



Objectifs

Définir les indicateurs, les modèles, les outils de simulation et les conditions d'utilisation, pour simuler le confort et évaluer la réduction prédictible des besoins de froid grâce aux techniques de refroidissement par ventilation. Produire des recommandations pour optimiser les projets et prendre en compte dans la réglementation les techniques de refroidissement par ventilation. Ce projet est une contribution à l'Annexe 62 de l'AIE – ventilative cooling [1].

Résumé

Les bâtiments isolés de haut standard énergétique n'ont plus d'éléments dissipatifs, ce qui augmente les risques de surchauffe. Le seul moyen pour évacuer la chaleur, sans augmenter la consommation, reste le refroidissement par ventilation. Le nouveau cadre normatif suisse définit les conditions de protection estivale, mais il n'apporte pas de réponse pour la mise en œuvre, l'optimisation et la prise en compte du refroidissement par ventilation dans les calculs de consommation prédictible.

Nous avons défini un bâtiment de référence réel, et réalisé un monitoring pour mesurer son comportement thermique avec 3 stratégies de refroidissement par ventilation. Cette base expérimentale a permis de calibrer et vérifier la précision de 3 logiciels de simulation dynamique (Dial+, EnergyPlus et BSim).

Sur cette base méthodologique solide, nous avons simulé les indicateurs de confort, les indicateurs d'énergie et les indicateurs de risque, définis dans le projet AIE Annexe 62, sur une année entière pour divers climats et conditions d'utilisation. Ces indicateurs, dits « indicateurs système », permettent de comparer les stratégies passives de refroidissement par ventilation avec des stratégies actives traditionnelles, donnant la possibilité aux professionnels d'optimiser leurs projets et aux institutions de prendre en compte les stratégies passives au même titre que les stratégies actives.

La définition des indicateurs énergétiques par Estia dans le cadre du projet Annexe 62 pour le refroidissement par ventilation constitue une réelle avancée méthodologique, permettant pour la première fois de comparer cette stratégie passive avec les systèmes actifs de climatisation et quantifier ses avantages. Le potentiel de réduction des besoins de froid d'une stratégie de refroidissement passif (CRR), le ratio d'efficacité énergétique d'un système de refroidissement par ventilation mécanique (SEER) et le ratio d'avantage entre un système passif et une climatisation active (ADV), permet de quantifier l'apport réel d'une stratégie passive. La quantification de ces indicateurs énergétiques, développés par Estia, a montré que le seul refroidissement réellement « free cooling » est celui par ventilation naturelle. Le refroidissement par ventilation mécanique peut s'avérer plus énergivore que la climatisation active avec des SEER dans certaines conditions plus défavorables.

Concernant le cadre normatif, nous avons développé en collaboration avec l'OCEN-Genève une procédure de vérification des mises à l'enquête pour le remplacement d'installations de climatisation et nous avons testé la validité et les problèmes d'utilisation de 3 logiciels prescriptifs (Dial+, SIA TEC-Tool et LESOSAI). Ce cadre normatif, qu'intègre aussi le refroidissement par ventilation, a été testé sur 3 études de cas réels.

L'utilisation des indicateurs de performance dans le processus de conception facilite le travail d'optimisation des systèmes et des stratégies de refroidissement par ventilation. Une série de recommandations de conception montre comment bien mettre en œuvre cette stratégie passive dans les bâtiments basse consommation : dimensionner les ouvrants, optimiser la stratégie de ventilation naturelle ou mécanique, optimiser la masse thermique, maîtriser les risques de gains thermiques.

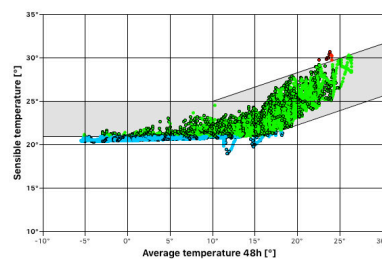


1 État de l'art

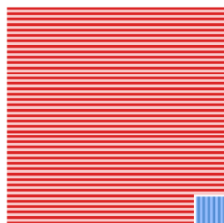
Le refroidissement par ventilation a été largement étudié dans les années 1990-2000 pour freiner la hausse des consommations d'électricité dans les pays du sud [1], [2]. Il revient à l'actualité aujourd'hui dans les pays de l'Europe centrale et les pays du Nord, suite à l'isolation accrue et à l'étanchéifiations des bâtiments [3] voulue par les nouvelles réglementations énergétiques.

Genève – Suisse

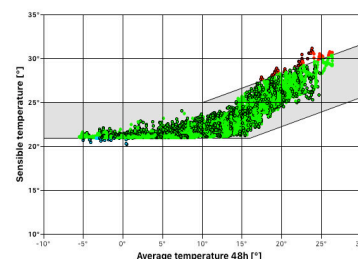
Pas d'isolation, verre simple (U5.5)
Construction typique 1930



Surchauffe : 7 h,
Besoins de chaleur : 134 kWh/m²
Besoins de froid : 2 kWh/m²



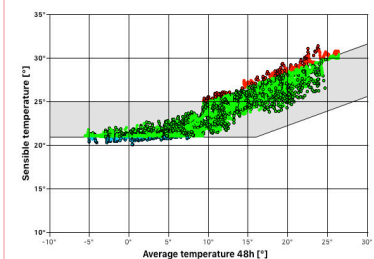
5 cm d'isolation, double verre (U3.5)
Construction typique 1970



Surchauffe : 37 h
Besoins de chaleur : 58 kWh/m²y
Besoins de froid : 5 kWh/m²



20 cm d'isolation, triple verre (U0.9)
Construction typique après 2009



surchauffe : 118 h,
Besoins de chaleur : 13 kWh/m²y
Besoins de froid : 10 kWh/m²



Tableau 1 : Risque de surchauffe et besoins de chaleur/froid du bureau standard défini dans AIE annexe 62. Les graphiques montrent la température intérieure en fonction de la moyenne glissante de la température extérieure et la surface grise indique la région de confort adaptatif selon EN 15 251 – SIA 180. La surface rose montre les besoins de chaleur et la surface bleu les besoins de froid.

Comme on voit sur le Tableau 1, les bâtiments de nouvelle génération ont vu leurs besoins de chaleur réduits drastiquement mais le manque d'éléments dissipatifs au niveau de l'enveloppe augmente les besoins de froid. Simulé aux conditions normales définies dans SIA 2024, sans stratégie particulière de refroidissement par ventilation à part la ventilation hygiénique, un bureau typique, moyennement vitré et disposant de bons stores bien contrôlés a vu ses besoins de chaleur baisser de 134 à 13 kWh/m², alors que ses besoins de froid sont passés de 2 kWh/m² (négligeables) à 10 kWh/m² (du même ordre que les besoins de chaleur d'un bâtiment de haut standard énergétique). Il y a des experts qui ne prennent pas au sérieux ces besoins de froid considérant qu'avec une machine de froid d'un SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) de 4 ou de 5, les besoins électriques se réduisent à 2-2.5 kWh/m² électriques. Cette énergie peut être facilement produite par un champ de capteurs solaires, avec une très bonne simultanéité des besoins. Cette idée serait juste, si nous ne comptons pas les risques de chaleur parasite ou de demande confort excessif par les utilisateurs. Si ce même bureau dispose d'une protection solaire déficiente ou mal gérée par les utilisateurs, il verra ses heures d'inconfort et ses besoins de froid augmenter, jusqu'à doubler voire même tripler si les utilisateurs demandaient 24°C au lieu de 26, situation très courante en présence d'un système de climatisation. Ces risques ne sont pas



des hypothèses d'ingénieur, nous les avons rencontrés dans les 3 études de cas que nous avons utilisées pour valider le cadre normatif concernant le refroidissement dans le Canton de Genève.

Sous nos latitudes, le potentiel de refroidissement par ventilation est important. Il a été étudié dans le passé dans le cadre de projets de l'OFEN [9]. Ceci est vrai pour toutes les régions de la Suisse. Cependant, les questions qui se posent sont les suivantes :

- à quel degré ce potentiel peut-il garantir le confort dans ces conditions,
- comment simuler correctement le confort et la réduction des besoins de froid,
- comment prendre en compte cette technologie passive dans le calcul de la consommation prévisionnelle du bâtiment, qu'il soit en phase de conception-optimisation par les planificateurs, ou en phase de contrôle lors des mises à l'enquête ou bien encore lors de la labélisation des bâtiments par les autorités.

Notre étude bibliographique (chapitre suivant) nous a confrontés au manque d'indicateurs permettant de comparer les performances de cette technologie passive avec la climatisation active. De plus, le manque d'expérience concernant la simulation du phénomène physique rend la stratégie de refroidissement par ventilation *suspecte*, tant au niveau des planificateurs de chauffage – ventilation – climatisation, qu'au niveau des autorités ou organismes de labélisation. C'est ce résultat qui a orienté l'effort que nous avons alloué à chaque tâche, tant pour le projet Suisse CoolingVent que pour notre contribution au projet de l'Agence Internationale de l'Énergie.

1.1 État de la recherche

Les personnes qui s'intéressent à la modélisation des phénomènes physiques liés au refroidissement par ventilation, aux techniques, au cadre normatif en Europe et aux logiciels de calcul, trouveront un document très exhaustif incluant un état de la recherche avant le commencement en 2014 de l'annexe 62 de l'Agence Internationale de l'Énergie libellée « AIE Annexe 62 for ventilative cooling ».

Ce document a été édité par Kolokotroni [3] et avec la contribution de 14 pays, dont la Suisse dans le cadre de ce projet. Il se trouve en libre-service [sur le site de l'Agence](#). Le lecteur trouvera dans ce rapport les essentiels de la théorie, présentés de manière claire et exhaustive, avec une bibliographie actualisée et complète. Dans ce rapport nous présentons un bref aperçu du rapport.

Dans un chapitre analysant **le potentiel et les limitations**, le rapport présente d'abord les méthodologies adéquates pour estimer le potentiel de refroidissement par ventilation en fonction des conditions climatiques. Les méthodologies telles que CCP (pour climate cooling potential) ont été explorées comme base de départ pour la tâche A1 du projet Annexe 62. Selon cette méthodologie, qui ne prend en compte que le climat, les régions de l'Europe du Nord et les îles Britanniques présentent un potentiel suffisant pour faire face à la surchauffe estivale. Les régions de l'Europe centrale présentent un bon potentiel, mais des contraintes telles que le bruit ou la pollution extérieure pourraient le limiter et les régions autour de la Méditerranée présentent un potentiel limité qui ne suffit pas pour garantir le confort estival sans recours à d'autres stratégies de refroidissement. Les méthodes existantes ne prennent en compte ni les caractéristiques du bâtiment qui sera refroidi, ni son affectation, ni les conditions d'utilisation. C'est justement sur ce point que l'Annexe 62 a voulu faire avancer la recherche et développer des méthodologies qui combinent la simulation et les données climatiques pour tenir compte des spécificités de chaque projet. Ces nouveaux développements sont particulièrement intéressants pour le cas de la Suisse, car étant sur la limite du potentiel, avec un climat relativement similaire pour toutes les zones urbaines du pays, le bâtiment lui-même et les conditions dans lesquelles il sera exploité jouent un rôle déterminant sur le potentiel.

Dans une autre section, ce chapitre parle des limitations, telles que le bruit et la pollution extérieure. À travers une série d'études de cas qui, outre des bâtiments administratifs, incluent aussi des bâtiments



scolaires ou des bâtiments d'exposition, il montre comment ces aspects ont été abordés pour réduire la température intérieure et les besoins de froid par ventilation nocturne.

Finalement, ce chapitre aborde les indicateurs de confort. L'indicateur des heures en dehors de la zone de confort selon la norme ISO 7730 et la norme EN 15251 présentés dans le rapport est particulièrement intéressant pour le cas de la Suisse. Cet indicateur est repris par la norme SIA 180, qui définit clairement quand la norme du confort adaptatif (EN 15251) peut être utilisée. Il aborde d'autres indicateurs de confort, comme des indicateurs cumulatifs des heures d'inconfort ou des indicateurs qui les moyennent mais il est moins enthousiaste pour ces indicateurs, car il juge qu'ils peuvent conduire à des conclusions erronées, surtout pour la ventilation naturelle, et suggère plutôt de travailler avec les deux normes précitées. La question sur les indicateurs de confort est résolue pour le cas de la Suisse avec la version 2014 de la norme SIA 180. Cependant, le manque d'indicateurs énergétiques et la confusion entre indicateurs et conditions aux limites, la confusion entre indicateurs « système » et indicateurs « de composant » qui est la base de départ pour les nouveaux travaux de recherche sont tout à fait actuels aussi pour le cas de la Suisse où ces questions ne sont pas abordées par les normes. La contribution suisse à l'avancement du travail sur les indicateurs était importante, surtout concernant les indicateurs énergétiques. Ces travaux sont présentés dans les chapitres suivants.

Dans un autre chapitre, le rapport sur l'état de l'art offre un aperçu complet sur la manière dont les différents pays participant au projet traitent l'**aspect réglementaire** du refroidissement par ventilation.

Les résultats proviennent d'enquêtes menées au moyen de questionnaires remplis par les participants à l'Annexe 62. Les questions couvrent les normes du bâtiment, les méthodes de calcul énergétique et les règlements sur la mise en œuvre du refroidissement par ventilation. Les questionnaires sont présentés en détail. Le rapport conclut que les exigences sur le refroidissement par ventilation dans les réglementations sont complexes. Elles peuvent être classées en cinq catégories de paramètres comme suit :

- (a) la consommation d'énergie pour le froid
- (b) les paramètres du bâtiment influençant le refroidissement par ventilation
- (c) les exigences sur la ventilation, les débits d'air et les ouvertures de ventilation
- (d) la sécurité
- (e) les conditions de température, vitesse et humidité de l'air.

La réglementation suisse avec les normes SIA 180, SIA 382/1, SIA 2044 et SIA 380/4 ainsi que les exigences du MOPEC 2014 est une des plus complètes en Europe et couvre pratiquement tous les aspects. Ce chapitre analyse aussi les possibilités de simulation pour répondre aux exigences normatives et, ici aussi en Suisse, la situation est plus avantageuse avec les logiciels TechTool, LesoSai et DIAL+. L'analyse a toutefois identifié un manque de clarté sur les conditions aux limites, et la description des stratégies de ventilation, ce qui a orienté le travail de recherche. L'analyse a aussi identifié la nécessité de développer une norme internationale sur le refroidissement par ventilation qui aborderait également les méthodes de calcul. Ce travail a contribué à la mise en route d'une norme ISO et d'une norme EN sur le sujet. Au niveau de la Suisse, nous avons proposé un cadre normatif qui complète les normes SIA pour le Canton de Genève, où les exigences sur la climatisation de confort sont plus strictes (la loi cantonale interdit pratiquement la climatisation active).

Le rapport propose aussi un chapitre avec des **bâtiments exemplaires** qui font appel à la stratégie de refroidissement par ventilation. Ces bâtiments ont été proposés par les participants au projet et se situent dans différents pays et climats. Les résultats sont présentés sur deux pages : sur la première le lecteur peut trouver les informations sur le bâtiment, son affectation, les conditions climatiques en été et en hiver ; la deuxième page, quant à elle présente en détail comment la technique de refroidissement



par ventilation et les autres techniques passives ou actives ont été appliquées sur le bâtiment, quelles étaient les limites et quel confort ou qualité de l'environnement intérieur ont été obtenus.

Il y a une série d'éléments qu'on trouve dans la plupart des bâtiments : la masse thermique, les grilles, les ventilateurs, les détecteurs de CO₂ ou de température qui garantissent non seulement la réduction des besoins de froid mais aussi le confort et la qualité de l'air. Il a été noté que le comportement des occupants joue un rôle important sur le bon fonctionnement du système.

Sur la base de ces résultats, le projet Annexe 62 a initié une tâche spéciale afin de récolter plus de données sur une série d'études de cas, avec des résultats chiffrés, des simulations et une description plus détaillée des techniques et des composants utilisés pour la mise en œuvre de la stratégie de refroidissement par ventilation.

Un autre chapitre important, qui pourrait intéresser particulièrement les praticiens, fait l'état des **composants et des stratégies de contrôle** du refroidissement par ventilation. L'annexe 62 a dressé une liste de différentes techniques qui peuvent contribuer à la mise en place d'un système de refroidissement par ventilation. Ouvrants, protections des ouvrants, moteurs, systèmes de contrôle, sondes de mesure de la température, de la qualité de l'air ou de la météo sont les composants principaux d'un système. Mais il existe des éléments spécifiques, par exemple des traqueurs de vent en toiture, des systèmes avec masse thermique dynamique à changement de phase incorporée, des systèmes de cheminement de l'air dans les pièces, etc.

À l'aide des descriptions et illustrations photographiques figurant dans ce document, le lecteur pourra accéder à l'état de l'art de tous les types de composants :

- Composants pour guider le flux d'air : fenêtres, portes, ouverture en toiture, ouvrants spéciaux...
- Composants qui renforcent l'effet de ventilation : cheminées, atria, tubes venturi, tours de vent, capteurs de vents...
- Composants de refroidissement : par convection, par évaporation, par matériaux à changement de phase...
- Actuateurs et sondes : actuateurs à chaîne, à piston ou rotatifs... et sondes de CO₂, de température, sondes météorologiques etc.

Ce travail de recensement a constitué la base de la tâche B du projet et s'est concrétisé par un document appelé source-book. Il va au-delà du listing des composants. En plus d'une actualisation assez exhaustive, il analyse les performances et offre une documentation plus détaillée.

Finalement, le rapport de l'état de l'art présente **les méthodes de calcul et les logiciels existants**. Une liste qui pourrait être utile présente les logiciels utilisant des modèles détaillés pour le calcul du débit de ventilation, modèles à nœud, modèles empiriques, modèles mathématiques, modèles par éléments finis (CFD) et modèles couplant ventilation et transferts thermiques.

1.2 Conclusion

L'annexe 62 a entrepris la tâche d'actualiser l'état de la recherche pour répondre aux nouveaux besoins liés aux bâtiments de basse consommation. La recherche bibliographique a démontré que le manque ne se situait pas au niveau de la compréhension des phénomènes. Celle-ci a en effet été suffisamment explorée dans les années 90. Ce manque ne se situe pas non plus au niveau des outils de simulation. (un grand nombre d'outils figurent sur la liste non exhaustive du document de l'annexe).



Les efforts pour simuler le refroidissement par ventilation avec des adaptations d'outils statiques n'ayant pas abouti, on s'est donc orienté exclusivement sur l'adaptation d'outils de simulation dynamique existants. Or, dans les années 90, la simulation dynamique était inaccessible aux praticiens et était réservée à la recherche avec des outils comme ESPr ou Trnsys pour les échanges thermiques et COMIS, CONTAM pour les échanges aérauliques. Le couplage de modèles thermiques et aérauliques demandait une forte puissance de calcul et, dans la plupart des cas, soit la température, soit le débit d'air étaient imposés. L'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs personnels a offert la possibilité de programmer les algorithmes de calcul dynamique du climat intérieur couplés avec un calcul du débit d'air en fonction de la température intérieure. Les algorithmes de calcul sont déjà formalisés dans les normes européennes, et nous avons la norme EN 13 591 pour le calcul de la température intérieure avec un seul nœud pour la masse thermique ou la EN 13 590 pour plusieurs nœuds. Ces normes ont été aussi reprises par le cadre normatif de la SIA. Les normes EN 15 255 et EN 15 265 permettent également de calculer de manière dynamique la puissance de froid et les besoins de froid.

Nous pouvons classer en trois catégories les logiciels qui font appel à ces algorithmes de calcul :

- Les outils de justification normative :

En Suisse nous avons LesoSai, SIA TEC-Tool, DIAL + ou BSol qui prétendent respecter les algorithmes de calcul dynamique prescrits par les normes. Il s'agit presque toujours d'outils qui gèrent une seule zone à la fois.

- Les outils destinés à la recherche ou à l'optimisation :

L'outil américain Energy Plus tend à s'imposer comme référence dans le monde de la recherche. Mais il y a une série d'autres outils plus accessibles aux professionnels, comme IDA ice, assez répandu en Suisse allemande, Pleiade Confie en France, Trnsys, ESPr, ou TAS au Royaume-Uni. Les outils Suisses LesoSai et Dial+ peuvent aussi être utilisés pour l'optimisation dans un contexte d'une juxtaposition de zones uniques sans interaction.

- Les outils spécifiques :

Dans cette catégorie, nous pouvons classer les outils CFD pour analyser les trajets de l'air ou la stratification, les effets du vent. Il s'agit souvent d'outils simplifiés « maison » que divers groupes de recherche développent pour simplifier l'analyse des trajets de l'air ou l'effet de cheminée.

Il a été jugé utile de ne pas mettre l'effort de recherche sur le développement de nouveaux outils, mais sur l'analyse des possibilités des outils existants, afin d'identifier les difficultés d'utilisation et d'améliorer leur prise en charge par les utilisateurs, la principale difficulté dans la maîtrise des outils dynamiques étant la définition des conditions aux limites.

Les objectifs donc de l'Annexe 62 ont donc été concentrés sur les points suivants :

- Analyser et évaluer les méthodes et les outils de conception adaptés à la prédiction des besoins de froid, des performances du refroidissement par ventilation et du risque de surchauffe dans les bâtiments.
- Donner des lignes directrices pour l'intégration du refroidissement par ventilation dans les réglementations nationales pour le calcul de la performance énergétique et définir les indicateurs clés de performance qui permettent de comparer les performances de différentes alternatives, y compris les alternatives de refroidissement actif.
- Identifier les limites des solutions techniques existantes et leurs stratégies de contrôle et développer des recommandations pour des solutions de refroidissement par ventilation



flexibles et fiables pouvant créer des conditions confortables dans une large gamme de conditions climatiques.

- Démontrer les performances des solutions de refroidissement par ventilation en analysant et en évaluant des études de cas bien documentées.

Les objectifs du projet VentiCool financé par l'OFEN ont été orientés vers le développement d'indicateurs d'énergie, vers la fourniture d'un cadre expérimental en conditions d'utilisation réelles pour caler et vérifier les modèles et les logiciels et vers la mise en place d'un cadre normatif intégrant le refroidissement par ventilation. Étant une entreprise de conseil, nous avons aussi largement contribué à l'élaboration du guide de conception de systèmes de refroidissement par ventilation.



2 Indicateurs clé et modèles

L'analyse de la situation actuelle a montré qu'il y avait un réel besoin de définir des indicateurs, des modèles d'évaluation et des conditions aux limites pour évaluer les performances du refroidissement par ventilation en vue d'évaluer :

- le confort
- les besoins de froid
- l'énergie consommée pour le refroidissement

Les difficultés d'acceptation des stratégies passives sont dues, entre autres, au manque d'indicateurs permettant de comparer leurs performances avec celles des installations techniques de ventilation et de climatisation.

La méthode que nous avons choisie pour tester les indicateurs que nous avons développés, les performances des stratégies et la crédibilité des logiciels a été la suivante :

- Définir un bâtiment de référence et bien le documenter.
- Faire un monitoring pendant un été et appliquer les principales stratégies de contrôle de l'air (ouverture de jour, ouverture de nuit, ventilation mécanique, pas de ventilation).
- Simuler les stratégies de base avec les logiciels utilisés et valider la crédibilité de leurs résultats en comparant les résultats de simulation avec les mesures.
- Utiliser les outils de simulation validés pour faire varier tous les paramètres (conditions climatiques, stratégies de contrôle, paramètres thermiques des composants) et calculer l'ensemble des indicateurs.

Les difficultés d'acceptation et de mise en œuvre de la réglementation intégrant les technologies passives résident dans une appréhension de la simulation dynamique et de la complexité inhérente. Les logiciels existent, même s'ils sont relativement nouveaux, et la Suisse est bien dotée comparée à d'autres pays. Le cadre normatif aussi dispose presque tous les éléments pour évaluer les performances et fixer les objectifs. C'est l'intégration des normes qui doit avancer et la définition des conditions d'utilisation et de stratégies passives standards là où il n'y a pas d'indication dans le cahier technique SIA 2024. La définition d'indicateurs de performance va aussi faciliter l'intégration des technologies passives dans le dispositif normatif.

2.1 Bâtiment de référence

Nous avons choisi comme bâtiment de référence l'école primaire du Moréchon à Savièse. C'est un bâtiment construit en 2014 et labélisé Minergie. Il comporte 10 salles de classe, 3 bureaux superposés et une salle de gymnastique. La taille et la position des bureaux dans le bâtiment les rendent idéaux pour choisir un local de référence. Leur taille est similaire au local de contrôle de la norme EN 13590, ce qui facilite le contrôle de la validité des résultats. La simplicité de la construction avec des murs en béton apparent intérieur et isolation extérieure, la forme et la taille des ouvrants, la présence de stores à lamelles efficaces et bien gérés rend l'objet idéal pour constituer un bâtiment de référence sans particularités.

Le bâtiment a été suivi pendant les vacances scolaires 2015 lorsque l'école n'était pas occupée. Il a été équipé avec des sondes permettant de mesurer la température de l'air et les températures de surface des deux faces de chaque mur, d'une caméra qui enregistrait la position des stores et de la fenêtre, et de lampes électriques qui simulaient les gains internes selon le cahier technique SIA 2024.

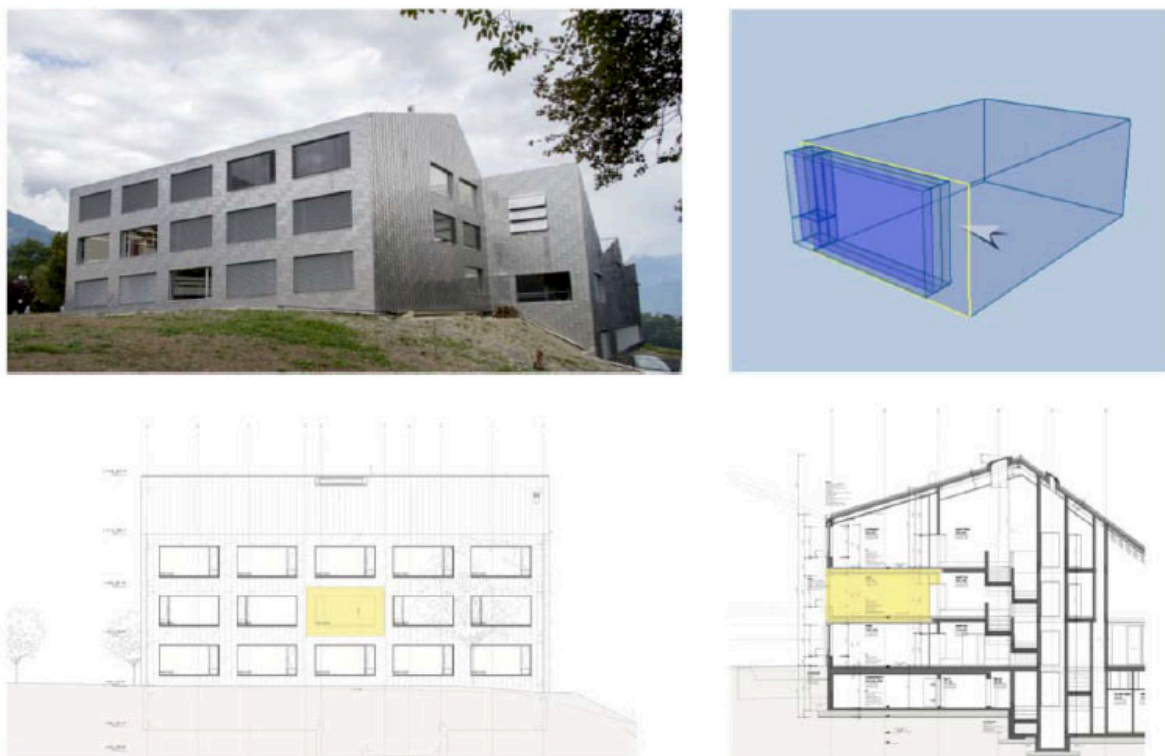


Figure 1 : Le bâtiment de l'école primaire Saint-Germain à Savièse a servi de référence pour être modélisé, suivi et comparer ses performances avec celles prédites par les modèles

Mur extérieur	U 0.2, mur béton, isolation extérieure	Conditions d'utilisation	Selon SIA 2024
Murs intérieurs	U 2.9, béton apparent	Débit de ventilation hygiénique	2.6 m ³ /m ² h selon horaire SIA 2024
Fenêtres	U _f 1.3, U _w 0.6 ouverture 0.6 X 1.2	Ouverture des fenêtres	Ouverture des fenêtres si T _i > T _e > 26 °C
Porte intérieure	U 1.2	Ventilation de nuit	Si T _i > T _e + 2°C et T _e > 21 °C
Plancher-plafond	U 0.32 Faux plafond, béton, parquet collé	Surventilation mécanique de nuit	5.2 m ³ /m ² h 24 :00 à 6 :00
Stores	Stores à lamelles automatiques g 0.1	Régulation des stores	Automatiques si T _i > 22°C / I > 200 W/m ²

Tableau 2 : Caractéristiques thermiques et conditions d'utilisation du bâtiment standards.



2.2 Modèles d'évaluation et conditions aux limites

Nous avons utilisé le logiciel DIAL+ [13] pour simuler les températures intérieures, les débits de ventilation naturelle et les besoins de froid pour les différentes stratégies de refroidissement par ventilation. La question de la validité de ses résultats se pose, non seulement pour le calcul des échanges thermiques, mais aussi pour le couplage du modèle thermique avec le modèle aéraulique et l'application des stratégies de contrôle. Ces questions se posent non seulement pour le logiciel DIAL+ mais pour tous les logiciels, quelle que soit la complexité des situations à simuler. Cette question a été examinée par beaucoup de groupes de recherche dans le cadre de l'annexe 62, et la réponse intéresse les utilisateurs mais aussi les institutions qui utilisent des logiciels pour vérifier la conformité aux normes ou aux labels de performance.

Dans un premier temps, nous avons comparé les fonctionnalités de 4 logiciels : Energy Plus, TRNsys, BSim et Dial+. Par la suite nous avons comparé leurs résultats avec les mesures sur le bâtiment de référence, avec 5 différentes stratégies de ventilation. La comparaison détaillée se trouve dans ce chapitre. La crédibilité des 4 logiciels ayant été prouvée, nous avons utilisé dans le cadre du projet international, le logiciel le plus approprié pour analyser les différents aspects du refroidissement par ventilation.

Dans le cas du projet CoolingVent nous avons utilisé Dial+ pour comparer les résultats avec 3 autres logiciels suisses et pour évaluer les indicateurs clé de différentes applications du refroidissement par ventilation. Les lecteurs qui ne s'intéressent pas aux détails quant à la validité des logiciels peuvent aller à la section 2.2.3. Les sections suivantes intéressent plus les éditeurs de logiciels et les autorités normatives que les utilisateurs.

2.2.1 Comparaison des logiciels Energy Plus, TRNSYS, BSim et Dial+

Le but de la comparaison n'a pas été de valider les logiciels. Chaque logiciel a eu sa procédure de validation. Dial+ et BSim sont validés selon EN 15255, EN15265, et ISO 13791, Energy Plus est validé selon les normes Ashrae et TRNSYS a été validé dans le cadre d'un projet de l'AIE selon la procédure BestTest. Le but de la comparaison était plutôt de tester l'aptitude de ces logiciels à prendre correctement en main le phénomène de refroidissement par ventilation.

Nous avons clairement deux types de logiciels. TRNSYS et Energy Plus sont destinés aux chercheurs et peuvent résoudre de situations complexes, alors que Dial + et BSim sont des outils orientés vers les normes nationales et l'optimisation destinés aux ingénieurs et aux architectes.

La prise en main des deux premiers logiciels est longue et leur apprentissage demande un grand investissement, alors que les deux autres sont simples d'utilisation, la représentation est visuelle et l'introduction des données facile et rapide.

La différence est marquée aussi par rapport à la présentation des résultats. Les deux premiers logiciels offrent des représentations graphiques rudimentaires ou pas du tout en ce qui concerne Energy Plus, alors que Dial + et BSim permettent la visualisation des résultats avec une multitude de graphiques, « timecharts », courbes du confort, graphiques visuels des flux d'air. En contrepartie, la flexibilité des outils simples et accessibles aux utilisateurs est limitée et se concentre à l'essentiel. Il s'agit de modèles monozones alors que pour les outils complexes l'utilisateur peut construire des modèles complexes, avec des flux d'air complexes, modélisant la stratification ou l'influence du vent.

Les 4 logiciels sont capables de modéliser les situations de base de refroidissement par ventilation. Néanmoins, pour les logiciels complexes l'utilisateur doit définir les conditions d'utilisation et les stratégies de contrôle de manière manuelle. Pour les logiciels orientés vers la vérification de la



conformité avec la réglementation nationale, les conditions d'utilisation standard selon les normes sont déjà implémentées, ainsi que les stratégies de ventilation les plus courantes.

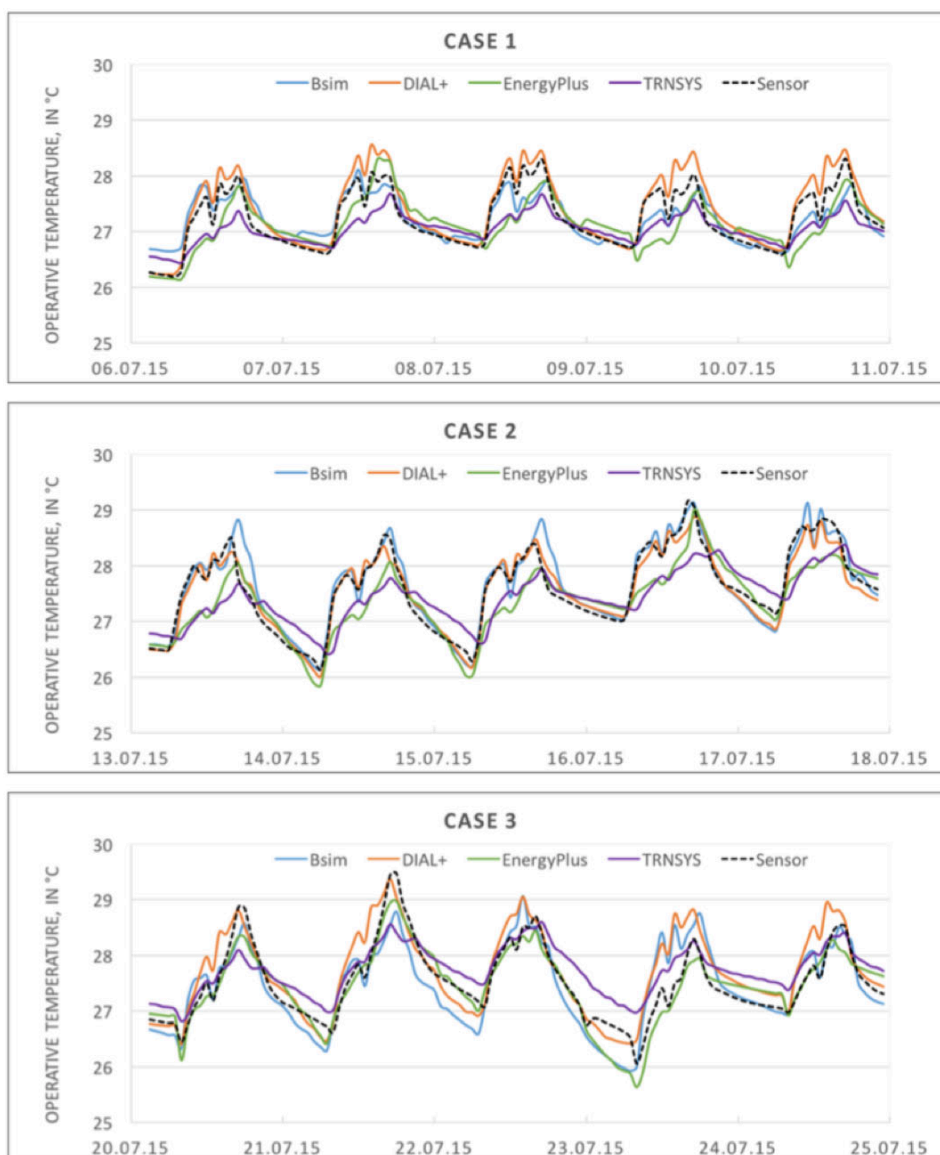


Figure 2 : Graphiques de comparaison de la température opérative simulée avec 4 logiciels avec la température mesurée sur le bâtiment de référence. Le cas 1 est avec une ventilation mécanique selon 2024, le cas 2 avec une ouverture de la fenêtre de 33% pendant la nuit et le cas 3 avec une fenêtre ouverte 33% en permanence. Lorsqu'il y a la ventilation naturelle, la ventilation mécanique est éteinte.

En règle générale la concordance entre les logiciels est bonne, de même que la concordance avec les mesures. L'écart type varie entre 0.2 et 0.5 °C. Deux autres cas ont été simulés pour vérifier le comportement des logiciels en cas de conditions de dérive. Le cas 4 considère la fenêtre ouverte à 66% tout le temps et un cas 5 sans aucune ventilation avec le store levé le dernier jour. L'influence du vent pour le cas 4 avec la fenêtre très ouverte donne un écart type un peu élevé pour les logiciels qui ne prennent pas en compte le vent de manière détaillée (1°C Dial +, 1.2 °C BSim comparé à 0.7°C pour les autres). Dans la situation avec une dérive sur les gains solaires, le logiciel BSim surestime la surchauffe avec un écart type de 1.6 °C contre 1°C pour Dial+ et 0.5 °C pour les autres.



En conclusion, tous les logiciels prennent en compte de manière satisfaisante la ventilation mécanique et naturelle par effet de cheminée.

La prise en compte du vent, une force d'entraînement aléatoire, est délicate. Le bâtiment ne peut pas compter dessus tout le temps. La prendre en compte pour le dimensionnement pourrait être problématique pour les situations d'accalmie : le bâtiment doit fonctionner dans toutes les situations, avec ou sans vent.

En revanche, ne pas prendre en compte du vent, se traduit par une sous-estimation des économies d'énergie, car en présence de vent faible à modéré, situation très courante sur le plateau suisse en été, le débit d'air par une fenêtre entre-ouverte est sous-estimé de l'ordre de 30%. Pour le plateau suisse, il est préférable de dimensionner un système de ventilation naturelle en absence de vent. Tout ce que le vent va apporter en plus ne nuit pas au système, et nous avons la garantie que le bâtiment fonctionnera dans toutes les conditions. En ce qui concerne la sous-estimation de la réduction des besoins de froid, négliger les apports supplémentaires du vent n'est pas un réel problème dans la mesure où, le plus souvent, l'application d'une stratégie de ventilation par effet de cheminée suffit pour réduire les besoins de froid à zéro. Par ailleurs, dans les régions urbaines, l'effet du vent est souvent très réduit par la canopée urbaine et la prise en compte de données mesurées par une station météo généralement située dans une zone dégagée est susceptible de générer des écarts importants. Dans des régions ventées de manière plus régulière (vallée du Rhône, certaines régions du Jura), il est possible de prendre compte le vent de manière qualitative avec les logiciels qui ne considèrent pas son effet.

2.2.2 Comparaison des logiciels DIAL+, LESOSAI, SIA TEC-Tool.

Ce chapitre propose une comparaison des logiciels DIAL+, LESOSAI et SIA TEC-Tool en utilisant le bureau du premier étage de l'école de Moréchon à Savièse comme local de référence. Le logiciel DIAL+ a été validé selon les exigences des normes européennes EN ISO13791 pour la température intérieure d'un local ni chauffé – ni climatisé, EN15255 pour les puissances de refroidissement et la température opérative d'un local climatisé (classe 3-a) et EN15265 pour les besoins de chaleur d'un local chauffé (classe b).

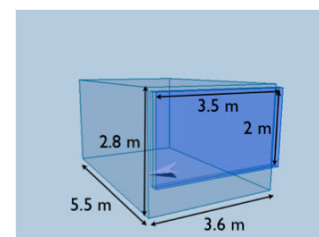
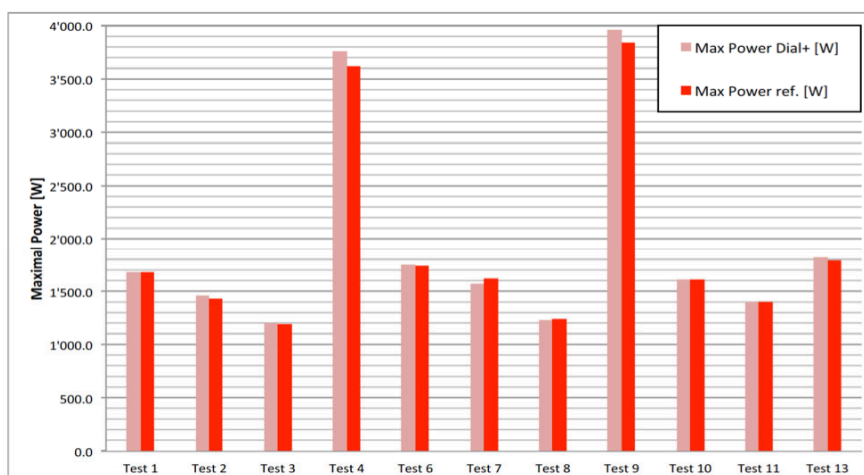


Figure 3 : extrait du rapport de validation du logiciel DIAL+ selon la norme EN 15255, qui montre une concordance de la puissance maximum de refroidissement simulée pour le local de référence avec les valeurs de la norme. La différence est inférieure à 5% pour tous les tests, valeur similaire aussi pour la puissance moyenne du local. Quant à la température opérative, la différence entre les résultats de la simulation et les valeurs de la norme est inférieure à 0.5°C ce qui place le logiciel en classe 3a.

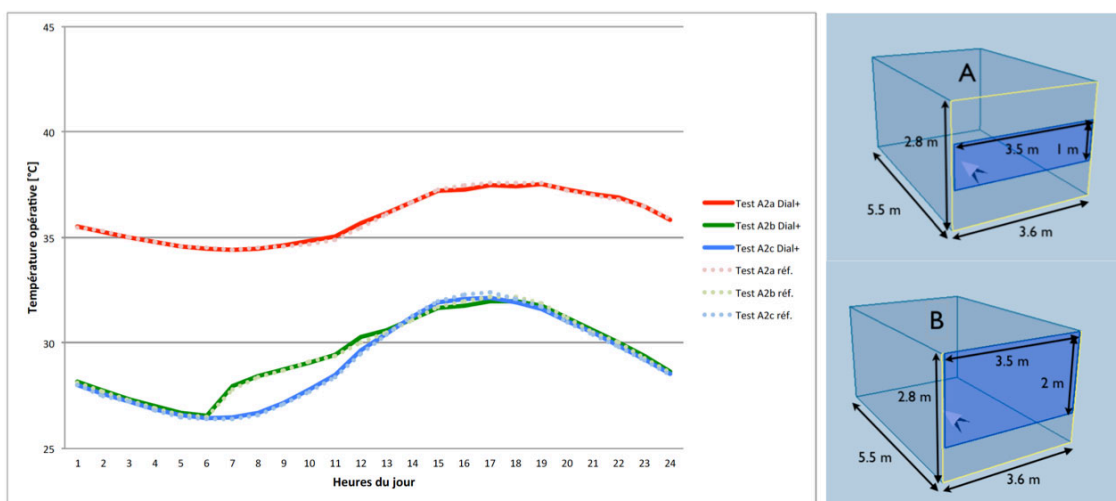


Figure 3 : extrait du rapport de validation du logiciel DIAL+ qui montre une concordance entre la température du local A simulée par le logiciel et la température de la norme selon la norme ISO13791.

SIA TEC-Tool respecte quant à lui uniquement la norme EN15265 (classe a), qui traite des besoins de chaleur pour le chauffage. LESOSAI a publié une comparaison directe des résultats avec ceux de SIA TEC-Tool. Leur approche et modèles implémentés dans les logiciels sont fortement similaires. Ces deux logiciels calculent le climat intérieur d'un local à température flottante (sans chauffage ni climatisation) selon la norme ISO 13790 qui est plus simplifiée (considérant un nœud de masse thermique) et acceptée par la SIA 2044. Nous avons comparé les résultats de la norme ISO 13790 et 13791 en simulant le même local avec les mêmes conditions. Dans l'ensemble, les résultats sont concordants, sauf pour les cas où l'isolation du local est à l'intérieur. Dans la mesure où la norme simplifiée ne considère qu'un seul nœud pour la masse thermique, elle ne peut pas évaluer correctement la différence entre le cas où l'isolation est à l'extérieur ou à l'intérieur. C'est le seul cas que nous avons identifié où les simulations ne donnaient pas des résultats proches. Néanmoins, vu que les cas avec isolation intérieure ne sont pas si courants dans la construction suisse et vu que la masse thermique est un paramètre parmi beaucoup d'autres, on considère que pour les besoins de vérification du confort la norme simplifiée préconisée par SIA 2044 est suffisante malgré ces différences.

La validation des logiciels selon les normes SIA, EN et ISO pour un jour typique avec des conditions aux limites fixées par la norme et la concordance des logiciels entre eux pour les mêmes conditions n'est pas tout. Simuler un local pendant une année ou une saison demande toute une série d'hypothèses sur les conditions d'utilisation. Dans le cas de la simulation dynamique, ces conditions sont multiples. Une partie des conditions dynamiques est fixée par les normes ou dans le cahier technique SIA 2024. Mais il y a des conditions aux limites qui ne sont fixées nulle part. Par exemple, la température intérieure à laquelle une ventilation nocturne s'arrête joue un rôle très important sur la température moyenne d'un local et le nombre d'heures de surchauffe. Dans DIAL+ il y a une température de surrefroidissement sous forme de consigne, qui peut être fixée par l'utilisateur pour arrêter la ventilation nocturne. Lorsque la baisse de température est rapide, le pas de temps est aussi très important, car surrefroidir le local pendant longtemps avant d'arrêter la ventilation peut influencer beaucoup le comportement du local et donner des résultats optimistes pour les heures de surchauffe.

Les trois logiciels que nous avons testés ont leur propre mode de rafraîchissement et de gestion des protections solaires (cf. Tableau 3 ci-après), et il est parfois délicat de trouver les équivalences de scénarios entre les logiciels. Vu qu'il n'existe pas de référence normative ou de directives proposant les scénarios les plus adéquats pour de l'habitation ou de l'administratif, ceux-ci sont dès lors créés et proposés par les éditeurs de logiciels. Ils sont en général basés sur l'utilisation connue dans les



habitations et les bureaux, mais sont moins représentatifs des salles de classe, des salles de réunion ou d'autres locaux particuliers.

	DIAL :	LESOSAI	TEC-TOOL
Rafraîchissement	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun - Surventilation mécanique - Ouverture manuelle des fenêtres pendant l'occupation - Ouverture automatisée des fenêtres pendant l'occupation - Ouverture automatisée des fenêtres hors occupation - Ouverture automatisée des fenêtres 24/24 	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement nocturne avec ventilation : <ul style="list-style-type: none"> - quand Text max > 25° de 22.00 à 7.00 - quand Text max > 22° de 22.00 à 7.00 • Ventilation naturelle par fenêtre <ul style="list-style-type: none"> - ouverture 1h à l'heure du repas - ouverture horaire de bureau quand pendant l'heure la Text > 18° - Pays chaud : 7h-9h ET 20h-23h - Aucune - Ouverture nocturne 22h-7h quand Text max > 25° - Ouverture nocturne 22h-7h quand Text > 22° - Ouverture Text > 20°, Text < Tint+2° et présence de personnes - Dernier ou avant-dernier • Facultatif : <ul style="list-style-type: none"> - Chauff./refr. actif 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilation par fenêtres <ul style="list-style-type: none"> - aucune, - hygiénique, - therm. occupation, - therm. 24h, - hyg+therm. oc., - hyg+therm. 24h, - constant • avec limite de refroidissement (T <°)
Gestion des stores	<ul style="list-style-type: none"> - 100% ouvert - 50% ouvert - automatisé standard (Baissé si Flux > 90 W/m2 sauf si T < 22°) - automatisé valeurs utilisateur 	<ul style="list-style-type: none"> • Seuil d'activation (si Flux > 90 W/m2 ET temp. ext > 16°) Possible de prendre irradiance à l'intérieur • Facultatif : <ul style="list-style-type: none"> - Temp. intérieure > 24° - stores fermés entre 22.00 et 7.00 	<ul style="list-style-type: none"> • Baissé si Flux > 90W/m2

Tableau 3 : Scénarios de rafraîchissement et de gestion des protections solaires propres à chaque logiciel. Il est difficile de trouver des équivalences entre les logiciels.

Pour comparer le comportement des logiciels, la température opérative du bureau a été simulée avec la gestion du rafraîchissement et des protections solaires au plus proche de la réalité : ouverture des fenêtres pendant l'occupation et stores automatisés (Figure 4).

Cette simulation montre des divergences importantes entre les logiciels, principalement en mi-saison. Le comportement de DIAL+ et de SIA TEC-Tool est plutôt similaire sur l'année entière. LESOSAI, quant à lui, ne parvient pas à rafraîchir le bureau par ventilation naturelle durant la mi-saison, avec une température max. de 26° qui semble être utilisée uniquement en été. Durant la période estivale, le comportement de la température opérative est similaire à celui des deux autres logiciels.

D'autres divergences ont été remarquées en comparant les autres variables de simulation (gains solaires, gains internes, débits de ventilation...). Ces divergences sont, pour la plupart, dépendantes directement du modèle de calcul ou de l'interprétation des normes SIA. Nous pouvons par exemple citer :

Gains solaires :

- DIAL+ recalcule la position exacte du soleil dans le ciel et prend en compte un facteur d'incidence réduit quand le soleil est rasant.
- Il n'est pas possible d'inclure un masque d'horizon proche dans SIA TEC-Tool qui propose uniquement un horizon fixe.
- De plus, les ombrages fixes (par exemple les casquettes) dans LESOSAI et SIA TEC-Tool sont supposés infinis et LESOSAI interpole le rayonnement au milieu de la façade et non de chaque fenêtre.
- L'incidence du scénario de gestion des protections solaires influe aussi sur les gains solaires qui pénètrent dans le local simulé.



Gains internes :

Les principales différences sur les gains internes entre les logiciels sont essentiellement basées sur l'éclairage.

- DIAL+ superpose le profil d'éclairage à celui d'occupation, ce qui paraît logique pour des affectations d'habitation ou administratives, mais moins pour des établissements scolaires.
- L'autonomie en lumière naturelle joue aussi un rôle important dans le profil d'éclairage en réduisant la puissance à 20% dans LESOSAI et SIA TEC-Tool.
- DIAL+ a opté pour ne pas prendre en compte la simultanéité mensuelle proposée par la norme SIA 2024.

Profil de ventilation mécanique :

- DIAL+ propose un grand débit lorsque les personnes sont présentes, alors que les deux autres logiciels augmentent cette période en ajoutant une heure avant et après l'occupation des locaux par les utilisateurs.

Ventilation naturelle :

La plus grande incidence résulte dans le pas de temps que peut ou non définir l'utilisateur.

- SIA TEC-Tool ne peut en effet pas réduire le pas de temps en dessous d'une heure ayant comme conséquence un refroidissement de la température intérieure souvent jusque vers les 15°.
- Pour les débits de ventilation naturelle, DIAL+ et SIA TEC-Tool affichent des profils similaires, alors que LESOSAI a un comportement très différent. Cela peut s'expliquer à priori par le choix du scénario pris en considération dans ces mesures.

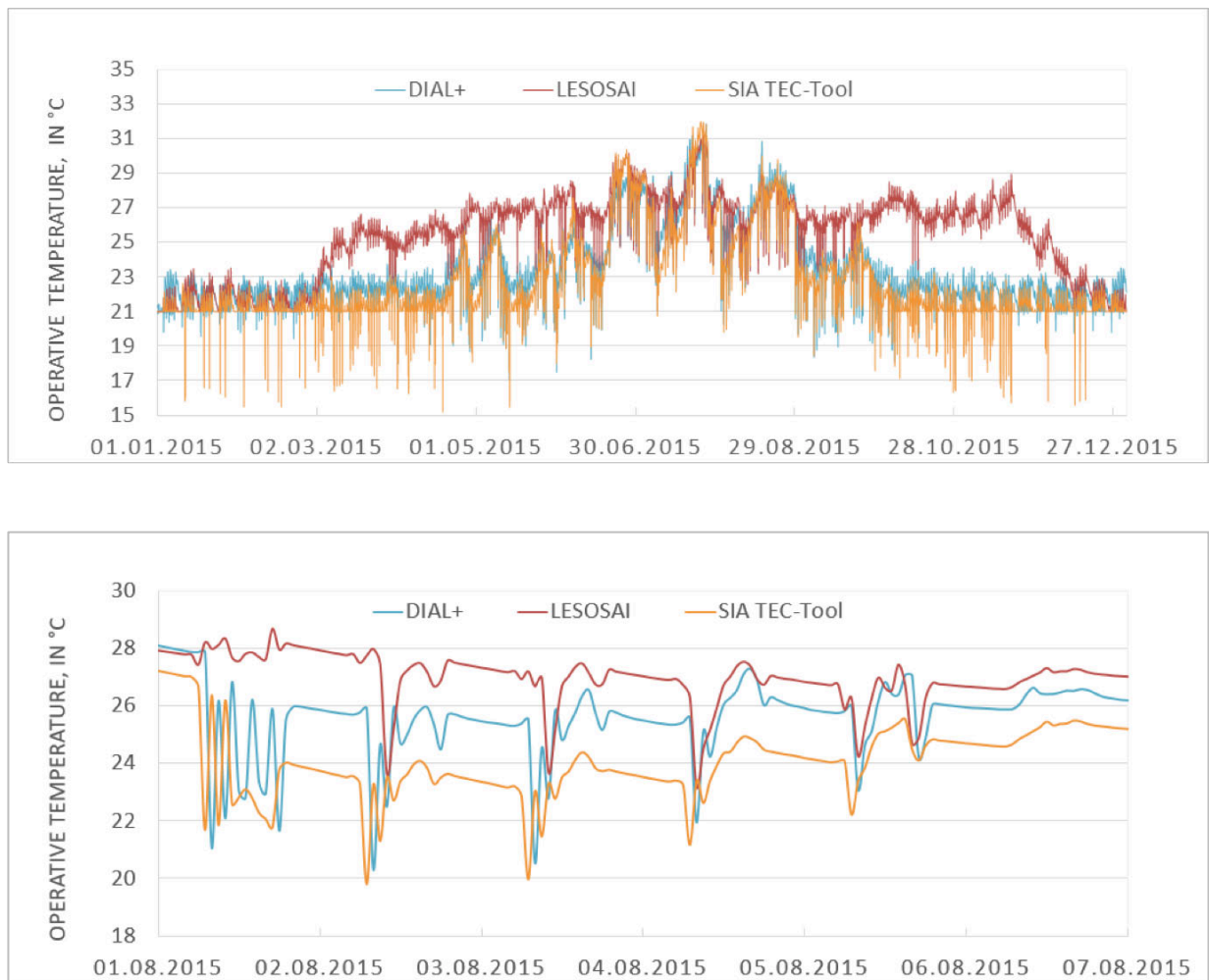


Figure 4 : Température intérieure simulée avec les 3 logiciels durant une année selon les conditions normales d'utilisation (ouverture possible durant l'occupation et gestion des protections solaires automatiques). Au-dessous, un zoom effectué durant une semaine d'été. Sur le graphique du haut, on remarque que SIA TEC-Tool surrefroidit jusqu'à 15°C la nuit ce qui rend ses résultats sur l'année optimistes, alors que LESOSAI n'applique pas la ventilation nocturne durant la mi-saison, ce qui rend ses résultats annuels pessimistes. Ces réglages ne sont définis dans aucune norme.

2.2.3 Discussion sur la comparaison des logiciels

Les logiciels dynamiques commencent à se « démocratiser » et viennent à la portée des ingénieurs, planificateurs ou architectes pendant la phase de projet, soit pour vérifier la conformité avec les normes SIA 180, SIA 382/1, SIA 2044, soit pour optimiser le confort thermique. Les méthodes de calcul sont stables et bien définies par le cadre normatif. Quant aux conditions d'utilisation standards, elles sont relativement bien définies pour les bâtiments chauffés et climatisés. En revanche, pour les stratégies passives, notamment pour la ventilation naturelle de jour ou de nuit, il y a un vide. Ni les horaires ni les conditions de régulation ne sont définis par le cadre normatif. Il y a aussi des ambiguïtés dans la manière de faire la transition entre la saison de chauffage et la saison de refroidissement (mi-saison). Le calcul dynamique des gains solaires reste aussi à définir. La pratique des logiciels de faire des hypothèses de calcul implicites sans donner accès ou informer l'utilisateur peut conduire à des erreurs.



La difficulté de fixer les conditions aux limites est d'autant plus grande que le paramètre dépend fortement du comportement des occupants ce qui a une influence forte sur le résultat de calcul. En attendant que le cadre normatif évolue, nous allons exposer les stratégies typiques d'utilisation que nous avons proposées et utilisées dans le cadre du projet AIE annexe 62.

2.3 Stratégies de ventilation pour refroidir

2.3.1 Ventilation de jour ou ventilation nocturne

La ventilation pendant les heures d'utilisation peut-être mécanique, naturelle ou les deux lorsqu'il y a un système de ventilation mécanique et que les occupants sont libres d'ouvrir leurs fenêtres. Avec la ventilation de jour, les occupants peuvent bénéficier en direct de la fraîcheur de l'air extérieur pour évacuer immédiatement la chaleur.

En Suisse, le nombre d'heures pendant lesquelles la température extérieure dépasse la température de confort ISO 7730 (en pratique lorsqu'elle dépasse 26.5°C en été) est relativement faible. Ainsi, pour une année standard Météonorm, nous avons 193 heures à Genève, autour de 100h sur le plateau, 174h à Sion, 161h à Lugano et 24h à la Chaux-De-Fonds (cf. Tableau à gauche de la Figure 5 Figure). Ces heures se situent sur le diagramme du temps (Figure) à la fin juin, en juillet et en août.

Les heures pendant lesquelles la température extérieure se trouve dans l'intervalle de confort surviennent surtout pendant la période de mi-saison et en été. 716 h pour Genève, 541h à Zurich et autour de 766h pour Sion. Avant 11 h du matin en période estivale (de mi-juin à mi-septembre), il y a à peu près la moitié des heures qui sont fraîches et la moitié qui sont confortables. Il est donc fortement profitable de ventiler naturellement avant 11h.

L'analyse temporelle de la température extérieure montre que le potentiel de refroidissement pendant les heures d'utilisation est extrêmement important. On comprend aussi que la chaleur dans les bâtiments de basse consommation ne vient pas par l'ouverture des fenêtres, mais par le rayonnement solaire et les gains internes. L'idée reçue selon laquelle il faut toujours fermer les fenêtres en été pendant la journée est fausse dans l'absolu. Elle n'est valable que si un élément de la façade (store, protection, volet, contrecœur) reçoit beaucoup d'énergie solaire et chauffe l'air extérieur avant que celui-ci ne pénètre dans le bâtiment.

C'est plutôt l'inverse qu'il faut promouvoir dans les recommandations générales pour le grand public : « ouvrez la fenêtre » lorsque dehors il fait moins de 26°C. Et il faut aussi éviter d'interdire aux utilisateurs d'ouvrir les fenêtres, y compris dans les bâtiments rafraichis. Le pouvoir de réduction des besoins de froid par la ventilation du jour, appelé CRR (pour Cooling Requirements Reduction) sera défini et quantifié dans les chapitres suivants.



	Chaud	Confort
Genève	193	716
Payerne	105	592
Zurich	82	541
Sion	174	766
Lugano	161	1008
La chaux de fonds	24	257

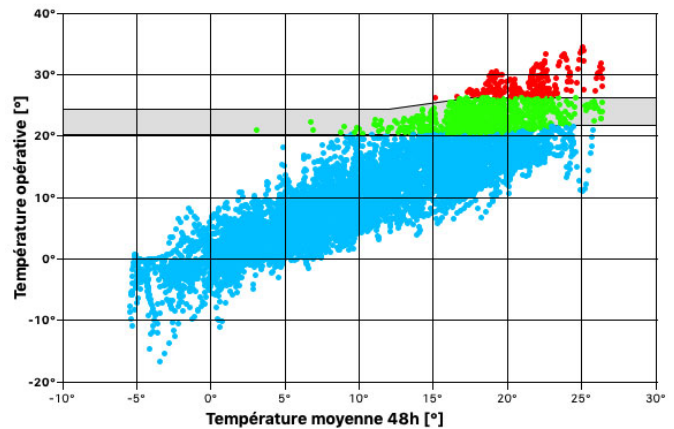


Figure 5 : Représentation de la température extérieure de Genève sur un diagramme de confort ISO 7730. En rouge les heures hors de la zone de confort de classe 2 (colonne « Chaud » sur le tableau), en vert les heures à l'intérieur de confort (« Confort » sur la colonne du tableau).

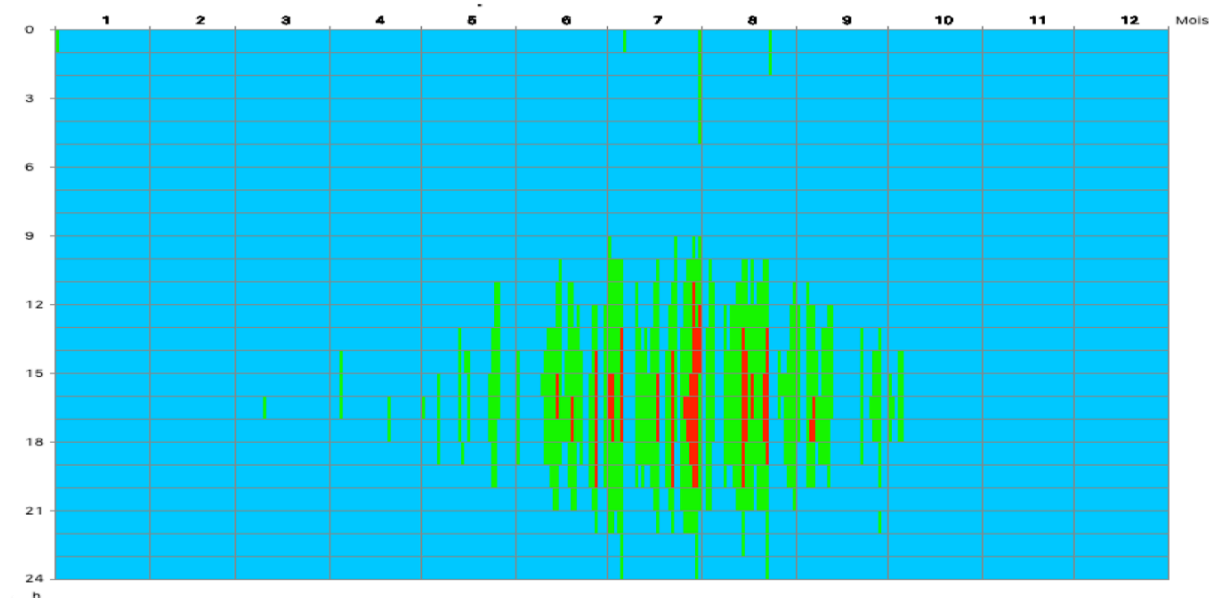


Figure 6 : Représentation de la température extérieure à Genève sur un diagramme de temps avec sur l'axe vertical les heures de la journée et sur l'axe horizontal les jours des mois de l'année.

La ventilation de nuit est d'une autre nature. Elle sert à évacuer la chaleur lorsque les utilisateurs ne sont pas là (locaux tertiaires) et à stocker le surplus de fraîcheur dans la masse thermique du local pour offrir le matin un local plus frais que la température extérieure. Dans le logement c'est différent, la ventilation nocturne rafraîchit aussi les occupants en direct. Si cette ventilation est mécanique, l'énergie pour faire tourner le système de ventilation en dehors des heures d'utilisation doit être mise sur le compte du refroidissement. On ne peut pas parler de refroidissement passif si un ventilateur tourne juste pour refroidir.



2.3.2 Mécanique ou naturelle ?

La première distinction est liée à la force qui fait déplacer l'air.

La ventilation mécanique est utilisée dans beaucoup de bâtiments pour la ventilation hygiénique. Pour répondre aux besoins décrits dans la norme SIA 180 pour les bureaux (36 m³/h par personne) ou pour les salles de classe (25 m³/h par personne), le cahier technique SIA 2024 donne respectivement des débits hygiéniques de dimensionnement de 2.6 m³/m².h (bureaux) et 8.3 m³/m².h (salles de classe). Mais ces débits ne sont pas gratuits.

Le SPI (Specific Power Input) du ventilateur est entre 0.34 et 0.55 W/m³/h selon le niveau des pertes de charge et la qualité des ventilateurs et jusqu'à 0.9 W/m³/h pour les bâtiments existants. Ventiler inutilement un bâtiment, surtout un bâtiment avec un ancien système, peut s'avérer un gouffre énergétique. Les indicateurs de performance énergétique que nous avons développés plus loin dans ce document permettent de quantifier la performance de la surventilation mécanique et éviter les cas où les gains sont inférieurs à la consommation.

Pour la ventilation naturelle, ce sont les dimensions et la position des ouvrants qui déterminent le débit de ventilation, en fonction de la différence de température avec l'extérieur et le vent. Dans un système hybride, il sera toujours préférable de privilégier la ventilation naturelle en été, même pendant les heures d'utilisation pour réduire la consommation électrique de ventilation, mais cette possibilité dépend des contraintes et des exigences d'exploitation.

2.3.3 Ventilation manuelle ou automatique

La ventilation nocturne naturelle peut être manuelle ou automatique :

Si elle est automatique, il faut un algorithme qui décide quand les fenêtres seront ouvertes ou fermées.

Si elle est manuelle, on doit compter sur le personnel pour ouvrir les fenêtres de manière systématique.

On notera que la ventilation nocturne manuelle fonctionne rarement de manière pleinement efficace et reste souvent une hypothèse sur le papier lors de la planification. En effet, même si la sécurité est maîtrisée avec des grilles de protection, les utilisateurs ne pensent pas toujours à laisser leur bureau ou salle de classe ouverts la nuit.

2.3.4 Stratégies standardisées à analyser

- V₀** Conditions standard SIA 2024 sans ventilation de refroidissement
- V_j** Ouverture optimale des fenêtres pendant l'utilisation ($T_e < T_i$ et $T_i > 26^\circ\text{C}$)
- V_n** Ouverture des fenêtres optimale jour et nuit ($T_e < T_i$ et $T_i > 26^\circ\text{C}$)
- V_m** Ventilation mécanique nocturne (2.6 m³/m².h lorsque $T_i > T_e + 2^\circ\text{C}$)

Pour toutes les stratégies nous considérons les conditions d'utilisation standard du cahier technique SIA 2024, à savoir : températures de consigne pour le chaud et le froid, gains internes standards, occupation standard, lumière artificielle standard.

Nous considérons aussi une automatisation des stores optimale lorsque $T_e > 21^\circ\text{C}$ et $I > 90 \text{ W/m}^2$ (I = rayonnement solaire global incident). L'algorithme de réglage et les conditions de simulation considèrent aussi que la ventilation de refroidissement s'arrête lorsque la température intérieure atteint la température de consigne pour le chauffage selon SIA 2024. Cette dernière condition n'est pas prise en



compte par tous les logiciels et si elle est oubliée dans les algorithmes de régulation, souvent les utilisateurs vont se plaindre d'avoir trop froid le matin.

Nous recommandons d'harmoniser ces conditions standard à tous les logiciels de calcul ainsi que les algorithmes de régulation.

2.4 Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance (IP, ce que les Anglo-saxons appellent KPI's pour Key Performance Indicators) sont des mesures quantifiables, pertinemment choisies, utilisés pour formuler les objectifs de conception de manière quantitative. Leur évaluation et suivi permet de surveiller le degré d'accomplissement de ces objectifs. Les IP sont utilisés dans les réglementations et les normes de construction pour vérifier les performances d'un projet et les comparer aux exigences. Ils peuvent constituer des instruments précieux pour conduire chaque phase de conception et orienter le processus de décision.

Avant l'annexe 62, il n'y avait pas de cadre d'IP pour la ventilation de refroidissement. Ceci constituait une barrière importante pour le développement et la promotion de cette stratégie passive. Dans ce chapitre nous reprenons le travail développé dans le cadre de l'annexe. Le projet de l'OFEN a grandement contribué à cette tâche en permettant de développer tous les indicateurs de performance énergétique. Alors que pour les indicateurs de confort l'équipe a fait le tri et choisi parmi les indicateurs existants déjà intégrés dans les normes, en ce qui concerne les indicateurs de performance énergétique le travail est totalement nouveau sur un terrain assez vierge.

Notre ambition est d'offrir les IP qui permettront aux concepteurs, aux prescripteurs et aux institutionnels dont la tâche est de vérifier la conformité des projets, un cadre bien formalisé rendant les performances des stratégies passives comparables aux performances des solutions actives du marché.

Les experts de l'annexe ont identifié 4 catégories d'IP pour la ventilation de refroidissement :

- **Les indicateurs du système.** Le terme « système » fait référence à l'ensemble des composants qui font fonctionner la stratégie de refroidissement dans sa globalité. Nous avons des indicateurs-système qui évaluent la performance énergétique ou le confort.
- **Les indicateurs des composants.** Ils représentent la performance de chaque composant du système individuellement. La performance électrique d'un ventilateur SFP ou SPI, le débit effectif d'un ouvrant, d'un dispositif de protection d'un ouvrant sont des indicateurs de composant.
- **Les indicateurs des conditions aux limites.** Ils représentent les hypothèses qui fixent le périmètre du modèle de calcul et les conditions d'utilisation. Un ensemble complet et explicite d'indicateurs des conditions aux limites permet une maîtrise des paramètres d'entrée du modèle. Les conditions selon SIA 2024, les conditions de simulation dynamique de la température intérieure selon SIA 180 ou encore la description des stratégies de ventilation dans la section 2.3.4 sont des indicateurs de cette catégorie.
- **Les indicateurs de sensibilité.** Ils informent sur l'incertitude des performances attendues mais permettent aussi d'anticiper les risques de dérive des performances à cause des dérives du contrôle, des conditions climatiques. Le nombre d'heures de surchauffe lorsqu'une protection solaire n'a pas fonctionné est par exemple un indicateur de sensibilité.

2.4.1 Indicateurs de confort

Il y a un long débat, une bibliographie riche présentée dans le document avec l'état de l'art **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et un cadre normatif assez complet sur les indicateurs de confort. En Suisse la norme SIA 180 - 2014 définit les indicateurs et les exigences nationales. Sa dernière version est à jour avec les dernières évolutions de la science et elle introduit la notion du confort adaptatif de la norme EN 15251 - 2007.

Les experts de l'annexe 62 se sont posé la question de savoir s'il fallait développer de nouveaux indicateurs de confort adaptés ou s'il y avait un indicateur plus adapté que l'autre. La réponse est que tous les indicateurs fonctionnent et chacun a ses particularités. Ces indicateurs expriment soit la fréquence de l'occurrence de l'inconfort, soit son l'intensité, soit ils construisent une fonction qui combine les deux. Il y a deux approches sur la notion même de l'inconfort et sur le critère de tolérance. Ce qui est retenu de cette discussion est :

- Il faut un seul indicateur synthétique pour permettre de manière simple à vérifier la conformité aux objectifs.
- Il faut des représentations graphiques qui illustrent la fréquence, les horaires d'occurrence et l'intensité pour orienter dans la bonne direction la conception et pouvoir construire, argumenter et justifier les recommandations ou décisions.

La norme SIA 180 est en avance sur le cadre normatif par rapport à bien d'autres pays. Elle distingue l'indicateur pour le confort :

- D'un espace où les occupants ont la liberté d'adapter leur confort avec l'ouverture des fenêtres ou l'habillement, et propose la règle de confort selon EN 15251.
- Des espaces fermés, conditionnés mécaniquement où les occupants ne peuvent pas choisir leur tenue vestimentaire où elle propose comme indicateur de confort la norme EN ISO 7730.

Nous retenons comme indicateur de confort unique le nombre d'heures en dehors d'une zone de confort pendant l'utilisation.

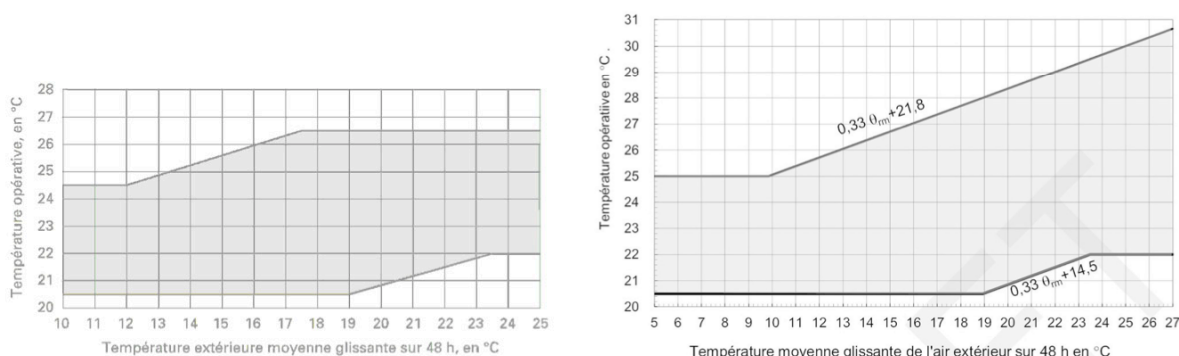


Figure 7 : Les zones de confort de la température opérative en fonction de la moyenne glissante sur 48°C selon la norme SIA 180. À gauche la zone de confort pour les espaces contrôlés selon EN ISO 7730, à droite la zone de confort pour la classe 2 du confort adaptatif de la EN 15251.

2.4.2 Indicateurs de performance énergétique

Nous avons développé 4 indicateurs de performance énergétique qui permettent non seulement d'évaluer les performances d'un système de refroidissement par ventilation, mais aussi de les comparer avec les systèmes de climatisation sur la même base.



Une des raisons de la méfiance envers les systèmes passifs, ayant été identifiée par les experts de l'Annexe 62, est le manque de rigueur dans l'évaluation de leurs performances. Leur apport est considéré implicitement dans la réduction des besoins. D'un autre côté, comme souvent l'énergie pour le surplus de ventilation ou pour les auxiliaires est faible, elle est aussi négligée. Mais il arrive que cette énergie prenne de proportions importantes, voire catastrophiques. L'appellation anglo-saxonne « free cooling » est donc souvent trompeuse.

Les indicateurs de performance développés sont objectifs, explicites et exhaustifs pour éviter aussi bien la sous-estimation de l'importance du refroidissement par ventilation que la surestimation. Nous avons donc :

- **E_{vc}** : L'énergie pour le refroidissement par ventilation. Elle peut être exprimée en énergie finale, énergie primaire, énergie primaire non renouvelable ou énergie pondérée en fonction des coefficients de pondération utilisés pour les différentes sources d'énergie mise en jeu.
- **CRR** : pour « Cooling Requirement Reduction » en anglais, soit la réduction des besoins de froid. C'est le ratio entre les besoins de froid d'une stratégie de refroidissement par ventilation et les besoins de froid selon les conditions standards sans stratégie de refroidissement.
- **SEER_{vc}** : pour « Seasonal Energy Efficiency Ratio of Ventilative Cooling » en anglais. Il concerne des stratégies de refroidissement par ventilation mécanique où le système de ventilation ou les auxiliaires consomment de l'énergie, même en quantité faible. Par analogie avec les systèmes de climatisation, il s'agit du ratio entre le CRR, c'est-à-dire le froid utile produit et l'énergie finale consommée. Ce ratio peut être comparé avec le SEER de n'importe quel climatiseur ou solution de climatisation et il est compatible avec celui utilisé pour classer les climatiseurs du commerce.
- **ADV_{vc}** : pour « Advantage of Ventilative Cooling ». Cet indicateur est utilisé pour comparer l'énergie consommée par un système de refroidissement par ventilation, à l'énergie consommée pour climatiser le même espace par un système de climatisation donné.

Cet ensemble d'indicateurs de performance énergétique peut caractériser un système de refroidissement par ventilation dans son ensemble, un composant (par exemple un monobloc de ventilation donné ou un ventilateur plafonnier, utilisés pour réduire les besoins de froid) ou même, comme indicateurs de sensibilité. On peut par exemple utiliser ces indicateurs pour caractériser la sensibilité d'un système de refroidissement par ventilation à l'influence du microclimat, aux dérives de réglages des protections solaires, ou aux dérives des conditions d'utilisation, comme l'occupation ou le contrôle des ouvrants ou les températures de consigne.

2.4.2.1 *E_{vc}, Énergie pour le refroidissement par ventilation*

L'énergie pour le refroidissement par ventilation doit considérer le supplément de consommation du système de ventilation pour évacuer la chaleur, l'énergie consommée par un système de refroidissement auxiliaire qui éventuellement serait utilisé comme refroidissement d'appoint, et l'énergie supplémentaire pour le chauffage qui éventuellement serait une conséquence de l'ouverture des fenêtres en mi-saison. La consommation de la ventilation hygiénique selon les conditions normales d'utilisation ne devrait pas être comptabilisée. Cet indicateur correspond à Ec de la norme SIA 380, du cahier technique 2040, du cahier technique SIA 2031, de Minergie, du CECB ou du MOPEC. La quantification de cet indicateur éviterait de négliger la surconsommation d'énergie pour évacuer la chaleur, laquelle prend parfois des proportions tellement importantes que l'adjectif « free cooling » en devient abusif. Si le « cooling » est « free », E_{vc} doit être égale à zéro, et ceci n'est vrai qu'avec la ventilation naturelle avec une énergie des auxiliaires négligeable.



$$E_{VC} = E_{Cc} + E_{Hi} + E_V - E_{Vst} + E_{El,aux} \quad (\text{Équation 1})$$

E_{VC} : Énergie du refroidissement par ventilation.

E_{Cc} : Énergie de la climatisation complémentaire.

E_{Hi} : Énergie du chauffage induit par l'ouverture des fenêtres ou la surventilation.

E_V : Énergie de ventilation (totale).

E_{Vst} : Énergie de ventilation standard (hygiénique).

$E_{El,aux}$: Énergie des auxiliaires liés à la ventilation de refroidissement.

S'il s'agit de calculer E_{VC} pour une instance de vérification, les énergies sont pondérées avec le facteur de pondération exigé. S'il s'agit d'optimisation, nous proposons d'utiliser l'énergie primaire non renouvelable.

En ventilation naturelle, la valeur cible d' E_{VC} est égale à zéro.

En ventilation mécanique, E_{VC} cible = 4.6 kWh/m² d'énergie primaire non renouvelable (1.7 kWh/m² d'énergie finale électrique).

2.4.2.2 CRR – réduction des besoins de froid

Pour calculer cet indicateur, il est nécessaire de définir les besoins de froid d'un scénario de référence. Le scénario de référence correspond aux conditions standards. Pour le cas de la Suisse, elles sont décrites dans le cahier technique SIA 2024 en fonction de l'affectation du local concerné, avec les débits standard de ventilation (hygiénique) sans stratégie de ventilation pour évacuer la chaleur.

$$CRR = \frac{Q_C^{Ref} - Q_C^{Scen}}{Q_C^{Ref}} = 1 - \frac{Q_C^{Scen}}{Q_C^{Ref}} \quad (\text{Équation 2})$$

CRR: ratio de réduction des besoins de froid. (Cooling Reduction Ratio)

Q_C^{Ref} : Besoins de froid pour le scénario de référence (conditions d'utilisation standard selon la SIA 2024 sans refroidissement).

Q_C^{ScEn} : Besoins de froid pour le scénario analysé.

Le CRR est un indicateur de l'efficacité de refroidissement d'une stratégie. Il est égal à zéro lorsque lorsqu'il n'y a pas de réduction des besoins de froid. Lorsqu'il est entre 0 et 1, il indique la part des besoins de froid couverts par la stratégie de refroidissement. Le CRR est égal à 1 lorsque le scénario de refroidissement couvre tous les besoins de froid et il n'y a pas de besoins complémentaires. Le CRR peut être négatif lorsqu'un scénario, au lieu de réduire les besoins de froid les augmente. C'est le cas par exemple de scénarios avec une protection solaire déficiente.

Si les besoins de froid selon les conditions de référence sont trop faibles ou sont égaux à zéro, cet indicateur n'est plus pertinent.

Comme nous pouvons voir sur la Figure 8, le CRR du jour n'est pas négligeable, 0.40 ±0.02 pour les villes du sud et de l'ouest et 0.55 ±0.01 pour les villes du plateau. Pour une stratégie optimale de refroidissement par ventilation, jour et nuit, le CRR dépasse 0.85, sauf pour Lugano. Lorsque le CRR dépasse 0.85, le confort adaptatif est pratiquement atteint.

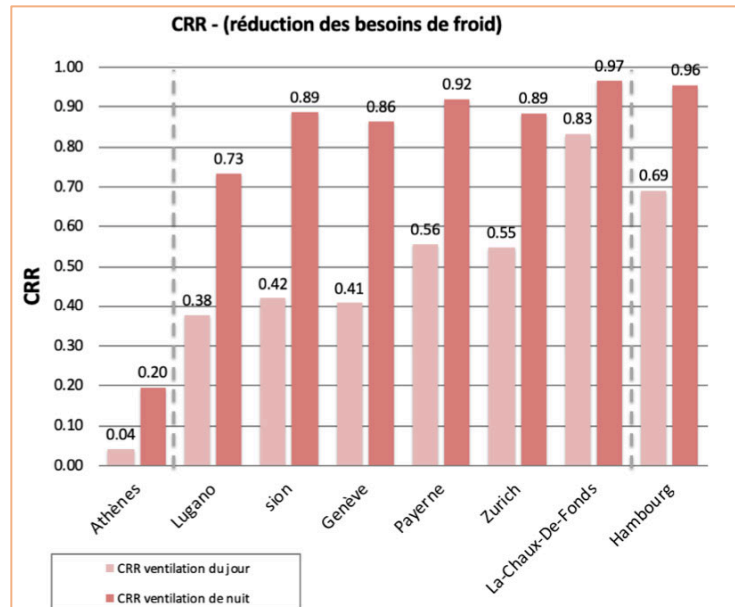


Figure 8 : CRR du bureau de référence pour les stratégies de refroidissement par ventilation du jour et de nuit pour différents centres urbains en Suisse comparé au CRR d'un climat du sud et un climat du nord.

Comme mesure de comparaison, nous avons simulé le CRR du même bureau à Athènes (à gauche sur la figure) et à Hambourg (à droite). Pour Athènes, nous avons simulé un bureau avec les caractéristiques thermiques d'un bâtiment « Quasi-Zéro-Energie » pour le climat du sud, soit 10 cm d'isolation au lieu de 20.

On constate que comparativement à Athènes nous avons un potentiel de réduction des besoins de froid par ventilation nettement supérieur, même au Tessin. De même, le climat en altitude du Jura présente plus de potentiel que les climats du nord de l'Europe.

Le potentiel de réduction des besoins de froid de jour en plaine (Lugano, Sion, Genève, Payerne et Zürich), se situe entre 0.38 et 0.56. Bien que cela ne soit pas suffisant pour couvrir tous les besoins de froid, ce potentiel peut être exploité, soit pour réduire la durée de la saison de refroidissement (éviter la climatisation avant mi-juin et après fin-août), soit pour gérer les surchauffes dues à une mauvaise utilisation de la protection solaire ou à un excès de gains internes.

Le potentiel bien plus important de ventilation additionnelle nocturne fait qu², dans la plupart des cas avec une exigence de confort selon la norme EN 13 521, cette stratégie peut éviter l'installation de climatisation. Dans les cas d'exigences de confort accrues, ou de contraintes d'utilisation spéciales (sécurité, code vestimentaire, densité d'occupation et d'équipements), elle peut être utilisée en combinaison avec un rafraîchissement complémentaire. De manière simple elle peut réduire la saison de refroidissement mais elle peut aussi fonctionner en combinaison hybride, avec la ventilation nocturne jusqu'à 11 h du matin, puis en mécanique avec une ventilation réduite. La ventilation nocturne peut aussi être appliquée par zone. Ces techniques seront discutées plus en détail dans le chapitre avec le guide de conception.

Le CRR d'une pièce de bureau de référence donne une bonne indication du potentiel de refroidissement des stratégies de ventilation. Comme c'est un nouvel indicateur, nous avons aussi voulu le tester avec des conditions réelles sur différents climats européens. Nous l'avons donc simulé pour certains bâtiments de démonstration étudiés, mesurés et documentés dans le cahier spécifique de l'annexe 62 [5].








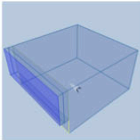
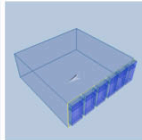
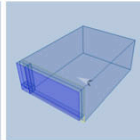
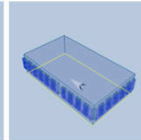
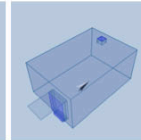
Pays	Autriche	Norvège	Suisse	Irlande	Portugal
Ville	Vienne	Bruhla	Savièse	Cork	Lisbonne
Utilisation	Bureau	Classe	Bureau	Bureau	Classe
Surface	25	49	35	89	31
Bâtiment					
Molèle DIAL+					
Heures hors du confort EN 13571 sans stratégie	929	33	996	279	654
Besoins de froid sans stratégie	8.0	1.6	8.4	1.5	10.6
Heures hors du confort EN 13571 vent. jour	0	0	216	62	228
CRR ventilation du jour	0.76	0.62	0.52	0.97	0.23
Heures hors du confort EN 13571 vent. Nuit	0	0	0	0	0
CRR ventilation de nuit	0.90	0.82	0.89	0.99	0.63

Tableau 4 CRR et les indicateurs de confort pour 5 bâtiments de démonstration du projet AIE Annexe 62.

Tous les bâtiments du tableau fonctionnent et garantissent le confort sans climatisation. Comme nous pouvons constater, leurs CRR, tant pour la stratégie de ventilation de jour ou de nuit, sont cohérents avec celui du local de référence. Bien que le potentiel de réduction des besoins dépende d'une multitude de facteurs, l'analyse de ces résultats nous enseigne que les paramètres essentiels d'influence sont le climat mais aussi et surtout la stratégie de ventilation. Cela s'explique par le fait que le seul élément dissipatif du système est l'ouverture des fenêtres ou la surventilation mécanique, car la ventilation hygiénique ne suffit pas d'évacuer toute la chaleur emprisonnée dans l'enveloppe isolée.

Le CRR comme indicateur a été étudié sur des bâtiments réels où la stratégie de ventilation a réglé complètement l'inconfort estival sans climatisation ou rafraîchissement complémentaire. Dans ces cas, les indicateurs de confort sont suffisants pour orienter la conception et le contrôle des performances. Le potentiel de cet indicateur sera particulièrement intéressant dans le cas de bâtiments à climatisation hybride, où la réduction des besoins de froid profite au système mécanique, soit par la réduction de la durée de la saison de refroidissement, soit par la réduction des heures de fonctionnement du système, soit par la maîtrise des accidents de surchauffe par de gains thermiques imprévisibles (mauvaise maîtrise des stores, gains internes imprévisibles etc.). C'est un indicateur qui sera très utile dans la nouvelle annexe de l'AIE nommé « resilient cooling » qui analysera ces systèmes hybrides.

2.4.2.3 SEER_{VC} – Efficacité saisonnière du refroidissement par ventilation

Par analogie avec les climatiseurs conventionnels, lorsqu'il y a de l'électricité mise en jeu pour faire fonctionner une stratégie passive, nous pouvons faire le ratio entre le froid équivalent fourni ou économisé et l'énergie électrique dépensée. Dans le cas du refroidissement par ventilation, l'énergie électrique consommée concerne la ventilation. Comme le froid n'est pas fourni directement pendant les heures d'utilisation, mais plutôt stocké pendant la nuit, nous avons proposé de faire le bilan entre les besoins de froid sans et avec la stratégie de refroidissement et de diviser le bénéfice net de froid par la consommation d'énergie électrique du système. Un ratio entre la puissance électrique et la puissance de froid, comme nous faisons dans le cas de systèmes actifs pour déterminer un coefficient de performances, n'aurait pas de sens.



Pour calculer cet indicateur, il est donc de nouveau nécessaire de définir les besoins de froid d'un scénario de référence correspondant aux conditions standards et les besoins de froid du scénario évalué. Comme pour le CRR dans le cas de la Suisse, les conditions d'utilisation standards sont décrites dans le cahier technique SIA 2024 pour l'affectation du local concerné.

$$SEER_{VC} = \frac{Q_C^{Ref} - Q_C^{Scen}}{E_{VC}} \quad (\text{Équation 3})$$

$SEER_{VC}$: Efficacité saisonnière du refroidissement par ventilation. (System Energy Efficiency Ratio of Ventilative Cooling)

Q_C^{Ref} : Besoins de froid pour le scénario de référence (conditions d'utilisation standard selon la SIA 2024 sans refroidissement).

Q_C^{Scen} : Besoins de froid pour le scénario étudié.

E_{VC} : Énergie de ventilation pour la climatisation (Équation 1).

Le $SEER_{VC}$ est un indicateur de composant, qui caractérise l'efficacité de la ventilation mécanique. Il indique, comme pour les climatiseurs conventionnels, le ratio entre le froid (équivalent) fourni et l'énergie électrique dépensée pour une saison. Il peut donc être comparé directement avec le SEER [26] d'un système alternatif conventionnel, fourni par l'industrie climatique. Plus le $SEER_{VC}$ est grand, plus le système est efficace.

Pour illustrer l'utilisation de l'indicateur $SEER_{VC}$ nous allons l'appliquer sur 4 stratégies de refroidissement par ventilation à Genève dans un bureau du bâtiment de référence que nous avons décrit précédemment. Nous allons appliquer la stratégie V_m définie dans la section 2.3.4 réalisée avec 3 ventilateurs différents :

1. Un ventilateur simple flux de SFP 0.014 W/m³/h
2. Un monobloc de ventilation double flux nouveau de SPI 0.45 W/m³/h
3. Un ancien monobloc de ventilation double flux avec prétraitement de SPI 0.75 W/m³/h
4. Un monobloc de ventilation double flux nouveau de SPI 0.5 W/m³/h avec puit canadien.

	SFP/SPI (W/m ³ /h)	Class d'énergie équivalente	$SEER_{VC}$
Ventilateur simple flux	0.014	>A++	15.0
Monobloc moderne	0.45	C	4.3
Monobloc ancien	0.75	G	2.5
Monobloc avec puit canadien	0.5	B	4.7

Tableau 5 : Évaluation du $SEER_{VC}$ et de la classe d'énergie équivalente de 4 systèmes de refroidissement par ventilation mécanique du local de référence

Le nombre d'heures de fonctionnement de la ventilation ayant pour but de refroidir est de 700 heures. Comme on peut voir sur le Tableau 5, un extracteur simple pour déplacer l'air pendant la nuit, est équivalent à un climatiseur meilleur que la classe A++. Les faibles pertes de charge et un ventilateur



de haut standard énergétique (classe SFP1 – 0.014 W/m²/h) permettent d'évacuer la chaleur avec peu de dépenses d'énergie électrique. Le ratio entre l'énergie utile, c'est-à-dire la réduction des besoins de froid par rapport à la situation sans aucune stratégie de rafraîchissement, et l'énergie consommée par le ventilateur est de 15, ce qui correspond au SEER d'un climatiseur de classe A+++ qui aurait fait le même travail.

Ref. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/requirements-for-seasonal-efficiency-for-air-conditioning-units>

A+++	≥ 8.50		C	$4.10 \leq \text{SEER} < 4.60$
A++	$6.10 \leq \text{SEER} < 8.50$		D	$3.60 \leq \text{SEER} < 4.10$
A+	$5.60 \leq \text{SEER} < 6.10$		E	$3.10 \leq \text{SEER} < 3.60$
A	$5.10 \leq \text{SEER} < 5.60$		F	$2.60 \leq \text{SEER} < 3.10$
B	$4.60 \leq \text{SEER} < 5.10$		G	$2.10 \leq \text{SEER} < 2.60$

Tableau 6 Classes SEER de climatiseurs selon la Fédération des Associations de Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air REHVA. Nous utilisons les mêmes seuils pour classer l'efficacité d'une stratégie de refroidissement passif selon l'indicateur SEER_{VC}

Sur le Tableau 5 nous pouvons voir que ce qui est vrai pour une ventilation nocturne avec un ventilateur simple n'est pas vrai avec un monobloc de ventilation double flux. La perte de charge des filtres, des échangeurs, les trajets plus compliqués de l'air et le double ventilateur, augmentent la puissance nécessaire pour entraîner l'air de 0.014 W/m³/h à 0.45 W/m³/h.

C'est ce que nous avons constaté dans l'étude de cas réelle que nous avons utilisé comme bâtiment de référence à l'École de Moréchon à Savièse. Un très bon monobloc de ventilation d'un bâtiment scolaire labélisé Minergie n'offre qu'un SEER_{VC} équivalent à celui d'un climatiseur split de classe C. C'est quelque peu décevant pour une stratégie appelée communément « Free Cooling ».

La situation devient un peu meilleure en faisant profiter le système d'un rafraîchissement supplémentaire par un puit canadien correctement dimensionné. Nous avons rencontré ce système dans une autre étude de cas d'une école similaire au bâtiment de référence (École de la Villa Thérèse à Fribourg). Nous avons une légère augmentation des pertes de charge et un SPI de 0.5 W/m³/h, mais les bénéfices en termes de réduction de besoins de froid sont supérieurs à l'augmentation de la consommation des ventilateurs. Le SEER_{VC} de ce système est de 4.7, ce qui correspond à un climatiseur de classe B. Même si la situation avec l'utilisation d'un puit canadien devient meilleure, il serait abusif d'appeler « Free Cooling » un système de climatisation de classe B.

Il faut cependant faire attention à ne pas généraliser cette approche à toutes les affectations. Pour les écoles, ventiler pendant la nuit et le weekend entraîne une surconsommation par rapport à la ventilation selon les conditions normales décrites dans le cahier technique SIA 2024. Il s'agit d'une ventilation hors heures d'utilisation qui n'aurait pas lieu si nous n'avions pas besoin de refroidir. Donc cette consommation est mise sur le compte du refroidissement par ventilation.

Dans une villa, où le monobloc ventile jour et nuit pour les besoins hygiéniques, la ventilation nocturne ne doit pas être comptabilisée, sauf si un débit supérieur au débit de dimensionnement est appliqué, engendrant une consommation supplémentaire du système.

De même, il serait faux de généraliser le SEER_{VC} du puit canadien pour la villa pour une deuxième raison. Le SPI d'un double flux d'une villa, avec des longueurs de tuyaux et des pertes de charge plus faibles, tourne autour de 0.3-0.35 W/m³/h, donc si quelqu'un souhaite faire le calcul en tenant compte d'un débit de surventilation nocturne il trouvera un meilleur SEER_{VC}.



La situation devient clairement catastrophique avec un monobloc double flux des années 80 que nous avons rencontré dans un des cas que nous avons étudié pour élaborer le cadre légal à Genève. Le SPI du système de ventilation d'une banque était de 0.75 W/m³/h. Le SEER_{VC} de cette stratégie « Free Cooling » s'effondre à 2.5 et correspond à une classe énergétique G. Dans ce cas, il est préférable de climatiser le bâtiment par sa machine de froid, avec un SEER de l'ordre de 3, plutôt que faire tourner la ventilation toute la nuit.

Ces cas, très courants dans la pratique, montrent la pertinence de cet indicateur, et le besoin de prendre en compte toute l'énergie mise en œuvre pour une stratégie énergétique hybride. Il y a d'autres facteurs qui peuvent rendre une stratégie de ventilation mécanique énergivore, comme le risque de ventiler plus d'heures que nécessaire, de voir la température de l'air pulsé augmentée en le faisant passer par des tuyaux noyés dans le plancher ou en le faisant passer par d'autres zones du bâtiment, en lui augmentant sa pression à 300-500 Pa, etc. Dans le bâtiment de référence, nous avons observé que la température de pulsion pendant la nuit ne différait pas de la température intérieure. L'air se chauffait dans les dalles du bâtiment avant d'arriver dans les locaux à refroidir (ces phénomènes seront analysés plus en détail en tant qu'indicateur de risque).

Ces résultats nous ont conduit à définir un nouvel indicateur qui détermine la pertinence énergétique d'une stratégie hybride. C'est l'indicateur ADV_{VC} présenté dans le prochain paragraphe.

2.4.2.4 *Avantage d'une stratégie de refroidissement par ventilation ADV_{VC}*

L'avantage d'une stratégie de refroidissement par ventilation mécanique ou hybride par rapport à une stratégie de climatisation conventionnelle est mesuré par l'indicateur ADV_{VC}. Cet indicateur n'est rien d'autre que le ratio entre le bénéfice énergétique d'une stratégie et l'énergie consommée pour la mettre en œuvre.

$$ADV_{VC} = \frac{Q_{el,c}^{Ref} - Q_{el,c}^{Scen}}{Q_{el,v}} = \frac{SEER_{VC}}{SEER} \quad (\text{Équation 4})$$

ADV_{VC} : Avantage d'une stratégie de refroidissement par ventilation

$Q_{el,c}^{Ref}$: Consommation électrique du système de climatisation pour produire les besoins de froid du scénario de référence selon les conditions standard (SIA 2024 en Suisse).

$Q_{el,c}^{Scen}$: Consommation électrique du système de climatisation pour produire les besoins de froid du scénario de refroidissement par ventilation.

$Q_{el,v}$: Consommation électrique du système de ventilation.

SEER_{VC} : SEER de la stratégie de refroidissement par ventilation.

SEER : SEER du système de climatisation conventionnel.

Si ADV_{VC} est inférieur à 1, la consommation électrique du scénario de refroidissement par ventilation est supérieure à la consommation d'un système de climatisation. Un ADV_{VC} de 1 montre une situation neutre où les deux systèmes sont équivalents, et ADV_{VC} > 1 indique que la consommation électrique du scénario de ventilation est inférieure à celle du système de climatisation.



Pour illustrer l'utilisation de cet indicateur, nous avons comparé l' ADV_{VC} des 4 systèmes de refroidissement du Tableau 5 avec celui d'un climatiseur recommandé depuis 2012 par l'Union européenne de SEER 8.5 et avec celui d'un ancien climatiseur des années 2010 de SEER 4 [27] [25].

	SFP/SPI (W/m ³ /h)	SEER _{VC}	ADV_{VC} (SEER 4)	ADV_{VC} (SEER 8.5)
Ventilateur simple flux	0.014	15.0	3.75	1.76
Monobloc moderne	0.45	4.3	1.08 !	0.5 !
Monobloc ancien	0.75	2.5	0.63 !	0.29 !
Monobloc avec puit canadien	0.5	4.7	1.18 !	0.55 !

Tableau 7 : Avantage des stratégies de refroidissement mécanique par rapport à un climatiseur typique des années 2010 de SEER 4 (Classe D) et par rapport à un climatiseur moderne de SEER 8.5 (Classe A+++). Comme on peut le voir sur ce tableau, il y a que les systèmes de ventilation très efficaces qui peuvent concurrencer les climatiseurs modernes.

2.4.3 Indicateurs des valeurs aux limites et indicateurs de composant

Nous pourrions imaginer une pléthore d'indicateurs de composant en fonction du composant de ventilation naturelle. Le coefficient de décharge d'une protection devant une fenêtre, le débit de ventilation d'une ouverture ou de l'ensemble des ouvertures d'un local, la puissance de refroidissement par ventilation à une différence de température donnée, etc.

Les indicateurs des valeurs aux limites sont multiples. La SIA 2024 est un ensemble d'indicateurs avec des valeurs standard pour l'utilisation, la SIA 2028 détermine les conditions météorologiques et les SIA 180, 382/1 et 2044 déterminent les conditions aux limites pour la simulation dynamique des besoins de chaleur ou de froid, la température intérieure des locaux, les débits de ventilation naturelle etc.

Certains indicateurs aux limites, comme la masse thermique d'un local ou les gains solaires ou internes journaliers d'un local sont déjà utilisés par la réglementation pour fixer les valeurs *limite* ou les valeurs *cible*.

La norme 382/1 donne des valeurs indicatives pour les gains internes journaliers et, en fonction de ces valeurs et de la nature des fenêtres, elle indique si un refroidissement est nécessaire ou souhaitable.

	Apports thermiques internes Wh/m ² .jour		
	Aération par les fenêtres jour ET nuit	Aération par les fenêtres locaux occupés	Sans aération par les fenêtres
Nécessaire	>200	>140	>120
Souhaitable ¹	140-200	100-140	80-120
Superflu ¹	<140	<100	<80

¹ Refroidissement admis seulement dans les installations de faible puissance

Tableau 8 tableau de la norme SIA 382/1 avec les valeurs limites déterminant le besoin de refroidissement.



La norme SIA 180 n'adopte pas cet indicateur pour déterminer le besoin de refroidissement mais propose :

- soit des règles plus complexes qui tiennent compte aussi des gains solaires et de la masse thermique du local,
- soit une simulation dynamique pour contrôler si la température opérative est dans une zone de confort.

Il est délicat de baser les recommandations sur les indicateurs aux limites. Ceci peut servir pour une orientation « grosse maille » mais la prise de marges de sécurité larges conduit très souvent à des recommandations contre-productives. C'est le cas du Tableau 8 de la norme SIA 382/1. À suivre ce tableau, il sera souhaitable de climatiser tous les bâtiments de bureau, les écoles, les salles de réunion.

Dans le chapitre portant sur les études paramétriques, nous allons prouver que cet indicateur n'est pas pertinent pour justifier le besoin de refroidissement. Heureusement, la norme 382/1 se réfère aussi à la norme SIA 180 pour les bâtiments avec fenêtres ouvrables, et propose aussi la simulation dynamique avec des conditions sur le confort pour la justification du besoin.

Les règles simples de la norme SIA 180 sont aussi basées sur de tels indicateurs. Ainsi, un local avec <30% de surface de façade vitrée, une transmission solaire <0.1, une masse thermique moyenne et un débit de ventilation de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ou des ouvertures représentant au moins 5% de la surface nette de plancher est considéré conforme aux exigences de protection thermique estivale. Cependant, ces conditions sont largement pessimistes, et pour des locaux avec gains internes et solaires modérés des débits de l'ordre de $1\text{-}3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ peuvent être suffisants pour offrir de bonnes conditions de confort.

Si on applique la condition selon laquelle les ouvertures représentent 5% de la surface nette de plancher, pour le local du bâtiment de référence il est exigé d'avoir une surface d'ouverture de 1.75 m^2 . Or, avec une ouverture de 0.8 m^2 ouverte à 30%, soit 0.24 m^2 , les conditions de confort étaient assurées largement. Ici aussi, il est préférable de procéder par calcul et d'optimiser les ouvertures, la masse thermique, la qualité du store ou la part vitrée.

Par ailleurs, une ouverture horizontale de 0.5 m de haut x 2.0 m de large, ce qui est suffisant pour un local de 20 m^2 , offre un débit d'air de $200 \text{ m}^3/\text{h}$ à $5^\circ\text{C } \Delta T$, alors qu'une ouverture verticale de surface équivalente (2.0 m de haut x 0.5 m de large) offre $410 \text{ m}^3/\text{h}$, soit deux fois plus. L'ouverture couchée offre un potentiel de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ alors que l'ouverture verticale permet de dépasser les $20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Ceci montre que pour faciliter la conception des fenêtres, il est pertinent d'avoir un indicateur de composant rapide pour éviter des simulations multiples. La surface de fenêtres n'est pas un indicateur satisfaisant, car la forme et la position des ouvrants joue un rôle prépondérant pour le débit d'air et l'efficacité de la ventilation.

2.4.3.1 Débit d'air par une fenêtre à 2, 5 et 10°C de différence de température.

Le débit d'air à 2, 5 et 10°C de ΔT intérieur-extérieur est un indicateur qui peut servir pour dimensionner correctement une fenêtre.

À 2°C , l'ouverture doit garantir le débit hygiénique en ventilation naturelle pendant la majorité des heures journalières en été, soit : $30 \text{ m}^3/\text{personne}$ ou $2.6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ pour les bureaux et $8.6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ pour les écoles.

À 5°C , l'ouverture garantit la ventilation nocturne pendant la majorité d'heures en surventilation estivale.

À 10°C , l'indicateur montre le débit pendant la majorité des heures en hiver. Si ce débit est trop élevé, il faut prendre des mesures pour éviter une ouverture continue de la fenêtre et gaspiller l'énergie de chauffage.



La formule qui donne le débit d'air d'une fenêtre unique mono-orientée est la suivante :

$$q = \frac{1}{3} A \sqrt{\frac{g(T_i - T_e)(H_t - H_b)}{T_i}} \quad (\text{Équation 5})$$

$$q = \frac{1}{2} A \sqrt{0.001 v_{ref}^2 + 0.0035(T_i - T_e)(H_t - H_b) + 0.01} \quad (\text{Équation 6})$$

- q est le débit d'air en [m³/s] ;
- $\dot{A} = A_{geo} \cdot C_d$, avec A_{geo} = surface géométrique et C_d = coefficient de décharge de l'ouverture, soit 0.63 pour une ouverture rectangulaire et 0.4 à 0.5 avec une protection à lamelles devant.
- T_i et T_e sont les températures intérieures et extérieures en K,
- $H_t - H_b$ les hauteurs en haut et en bas de l'ouverture.

L'équation 6 donne le débit d'air de la même ouverture en tenant compte du vent, avec v_{ref}^2 la vitesse moyenne du vent à la hauteur de l'ouverture. Avec le débit calculé, il est alors facile de calculer la puissance de refroidissement pour ce débit.

Nous avons produit une série d'abaques que le lecteur peut trouver dans le guide de conception de l'annexe 62 [6] et qui donnent le débit et la puissance d'une ouverture seule, de deux ouvertures situées sur la même façade et de deux ouvertures situées sur des façades opposées. La Figure 9 montre l'abaque pour une ouverture seule. Le lecteur peut ainsi trouver le débit offert par des ouvertures de 1m de large et de 0.5, 1.0, 1.5 et 2.0 m de haut. Si l'ouverture est plus large ou plus étroite, la variation du débit est linéaire par rapport à la largeur. Attention, pour la hauteur, la variation suit une courbe parabolique comme on peut le voir sur le graphique de droite.

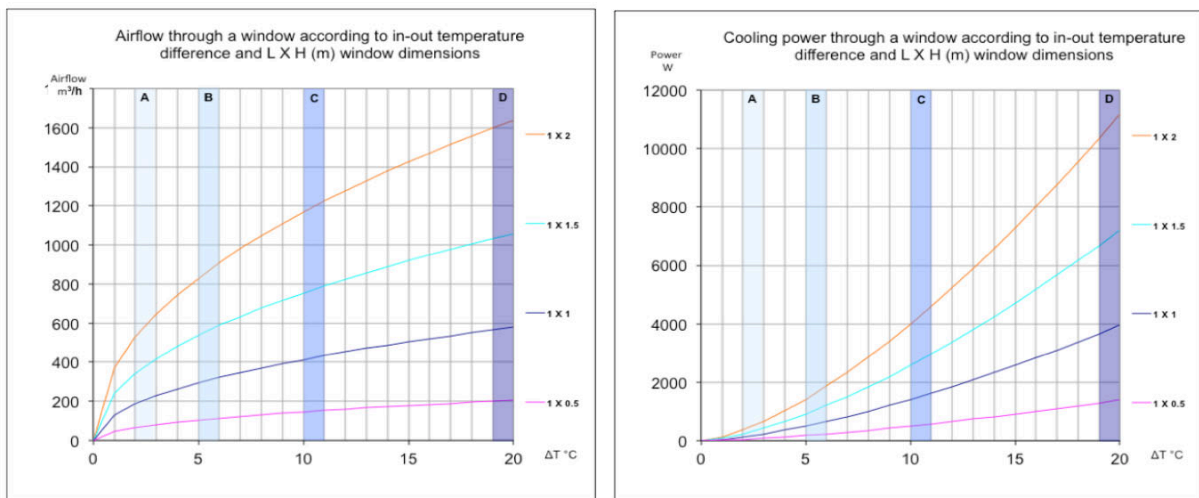
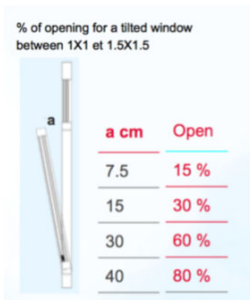


Figure 9 : Débit d'air et puissance de refroidissement d'une ouverture de 1m de large et de hauteur 0.5, 1, 1.5, 2 m pour des différences de température entre 0 et 20°C. La zone A correspond aux conditions de jour en été, la B aux conditions de nuit en été ou de jour à mi-saison, la C aux conditions ordinaires de jour en hiver et la D aux conditions froides en hiver.



Pour les ouvertures en imposte, nous avons effectué des simulations avec le logiciel LesoCool, ce qui nous a permis d'établir la règle suivante : pour des fenêtres de forme carrées dont le côté est compris entre 1.0 m et 1.5 m, la surface ouvrante (en %) peut être approximée en multipliant par 2 la largeur de l'imposte (distance « a » mesurée en cm, cf. schéma ci-contre). Ainsi, par exemple, si la distance « a » est égale à 15 cm, la fraction ouvrante de la représente 30% (2 x 15) de la surface de la fenêtre.

Figure 10 : Approximation d'une ouverture en imposte avec un pourcentage de l'ouverture rectangulaire correspondante

2.4.3.2 Mesures expérimentales du coefficient de décharge de diverses grilles de protection

Cas d'étude : Nous avons réalisé un prototype de grille de protection pour les besoins très particuliers de la ventilation naturelle de cellules carcérales. En plus de la protection contre la pluie et les insectes, il fallait aussi une protection discrète mais inviolable pour prévenir les évasions, une protection empêchant les détenus de passer des objets aux détenus des autres étages ainsi qu'une protection antibruit procurant une atténuation de 12 dB. La superposition de tous ces obstacles laissait supposer une efficacité très limitée pour la ventilation. C'était effectivement le cas du premier prototype avant l'optimisation.

Nous avons cherché dans la bibliographie pour trouver des coefficients de décharges applicable à ce type d'ouverture mais les données disponibles sont difficiles à trouver et à interpréter. En particulier, elles prennent souvent en compte le vent, ce qui peut créer un effet de guidage de l'air plutôt que le freinage dans des régions ventées [28]. Le *Handbook of hydraulic resistance* de I.E. Ideltchik [29] reste la référence en ce domaine mais, même dans cet ouvrage, il n'est pas possible de trouver la résistance d'une tôle déployée ou de tôles perforées avec différents diamètres de trous.

En absence de données utilisables, nous avons donc profité de la réalisation d'un prototype expérimental pour mesurer différentes combinaisons de grilles. Dans ce prototype, l'aérateur était placé à côté d'un vitrage de sécurité non ouvrant (cf. Figure 11). Le montage expérimental avait pour but de mesurer à la fois l'absorption acoustique et le coefficient de décharge. Ce dernier a été mesuré avec un blower-door qui, pour une pression donnée, mesurait le débit effectif et le comparait avec une ouverture équivalente. Les mesures sur l'absorption acoustique ne sont pas présentées ici.



Figure 11 : Montage expérimental pour mesurer l'absorption acoustique et la résistance de l'air de grilles de protection d'un aérateur.



La première mesure, réalisée sans obstacle devant l'ouverture, a donné un coefficient de décharge (C_d) de 0.63, soit exactement la valeur trouvée dans la bibliographie [30].

Les mesures suivantes ont permis de vérifier que le coefficient de décharge global d'une combinaison ouverture + protection ne correspond pas au produit des deux coefficients spécifiques (ouverture & protection), mais qu'il est supérieur.

En effet, selon [30] le coefficient de décharge est le produit du coefficient de vitesse et du coefficient de contraction géométrique du jet d'air dans l'ouverture. ($C_d = \epsilon \cdot \varphi$, ϵ étant le coefficient de contraction et φ le coefficient de vitesses).

Les mesures ont donné un coefficient de contraction (ϵ) de 0.7 ± 0.1 et un coefficient de vitesses (φ) de 0.85 ± 0.1 . Comme nous pouvons le voir sur la Figure 12, à ouverture géométrique équivalente (A_{geo}), les tôles étirées ou tôles déployées ont un coefficient de décharge inférieur à celui de la tôle perforée. Une hypothèse est que la tôle déployée, par sa forme crée plus de turbulences, donc un coefficient de vitesse plus faible. Une autre hypothèse, est que le freinage de l'air par la protection diminue la contraction du jet de l'air à travers l'ouverture. Le phénomène est intéressant et mérite d'être mieux étudié, mais le résultat pratique qui nous intéresse est que le C_d global est meilleur que le produit du C_d de l'ouverture x A_{geo} des perforations.

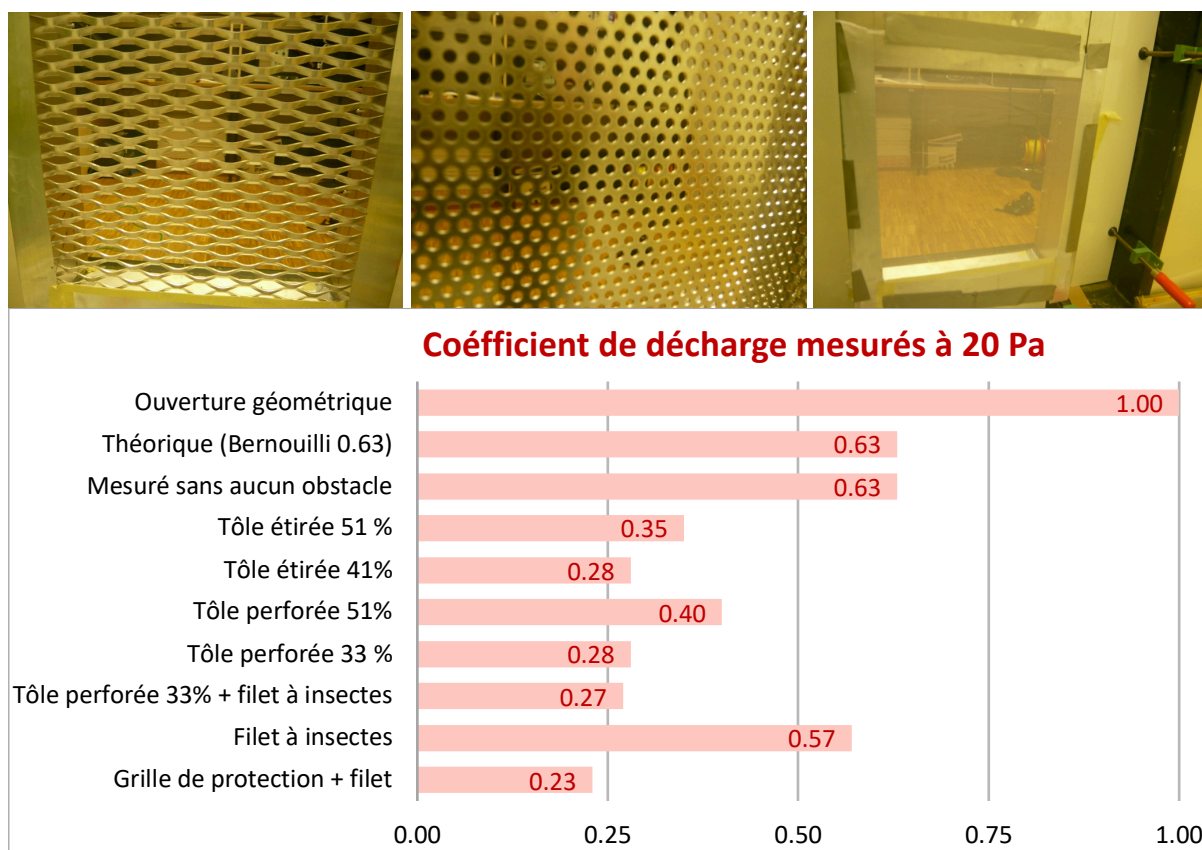


Figure 12 : Coefficients de décharge de principales protections. À gauche sur les photos du haut la tôle étirée, au milieu la tôle perforée et à droite le filet antimoustique.



2.4.3.3 Calcul du débit d'air à travers des ouvertures multiples

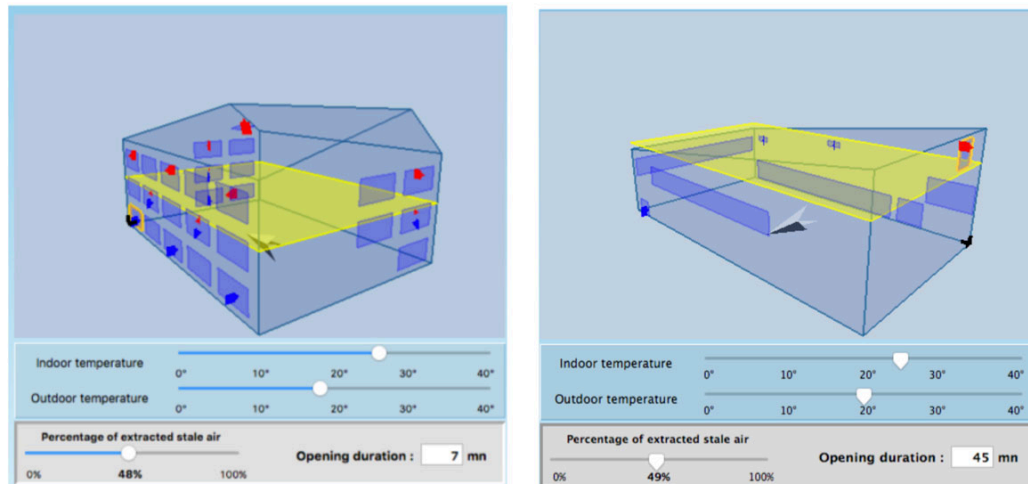


Figure 13 : Simulation du niveau neutre (plan jaune) et du débit total à travers le bâtiment avec DIAL+. Le logiciel offre aussi la possibilité de calculer le temps nécessaire pour remplacer un pourcentage de l'air confiné.

Calculer le débit d'air à travers deux ouvertures est facile et peut se résoudre avec l'équation de Bernoulli en calculant la position du niveau neutre créé par le rapport de surfaces de deux ouvrants. Les formules et l'abaque de ce calcul se trouve dans [6].

Néanmoins, s'il y a plus que deux ouvertures, il faut une résolution itérative des équations pour déterminer le niveau neutre. Une telle technique est implémentée dans le logiciel DIAL+ et le logiciel calcule le débit d'air à travers la zone et à travers l'ouverture pour une différence de température donnée. On notera qu'il y a peu de logiciels qui proposent un calcul de débit à travers plusieurs d'ouvertures.

2.4.3.4 Mesure du coefficient de décharge des stores devant la fenêtre mono-orientée



Figure 14 Ouverture mono-orientée sans et avec store et sondes de température et CO₂ à différents endroits du local

Pour mesurer le débit d'air dans un local, nous avons équipé celui-ci de plusieurs sondes de température (en haut, en bas de la fenêtre, en haut au milieu, en bas du local au milieu ou au fond) ainsi que de sondes de CO₂ à plusieurs endroits dans la pièce. Nous avons fermé la pièce, injecté une bonne quantité de CO₂ pour stabiliser la concentration au-dessus de 3000 ppm, puis nous avons ouvert la fenêtre pendant 10 minutes et mesuré la concentration de CO₂ stabilisée avant et après l'ouverture. L'air du local était mélangé continuellement avec un ventilateur qui brassait l'air afin d'avoir une concentration homogène (ce qui a été vérifié par les sondes placées aux différents endroits).

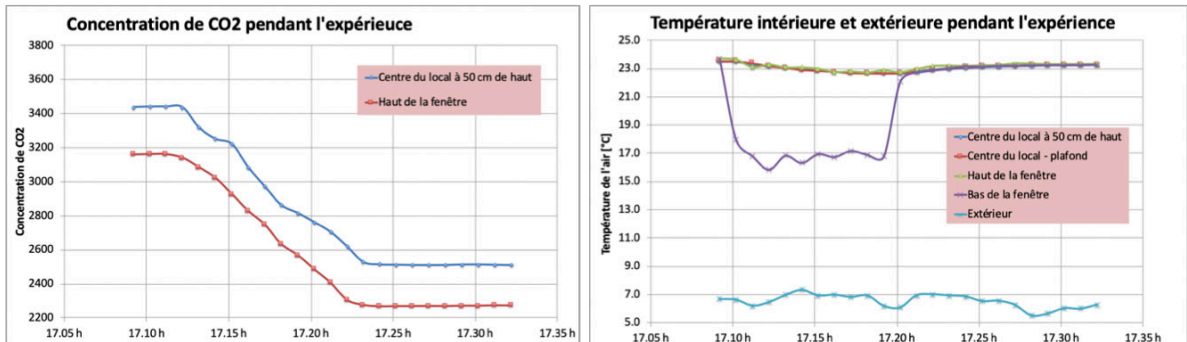


Figure 15 Mesure de l'évolution du CO₂ en haut et en bas de la fenêtre ainsi que des températures à différents endroits de la pièce.

La connaissance des valeurs de concentration du CO₂ avant et après l'ouverture ainsi que la mesure précise du temps d'ouverture, nous permet d'évaluer le débit d'air et avec la température moyenne de la pièce.

Par ailleurs, à l'aide de la température extérieure et des dimensions de l'ouverture nous pouvons évaluer le débit théorique selon Bernoulli et, par conséquent, le C_d de l'ouverture.

Si on exprime le C_d de l'ensemble ouverture + store comme le produit du C_d de l'ouverture par le C_d du store, le C_d du store est égal au produit entre le facteur géométrique de l'obstruction, et le facteur de freinage de l'air (équation 8).

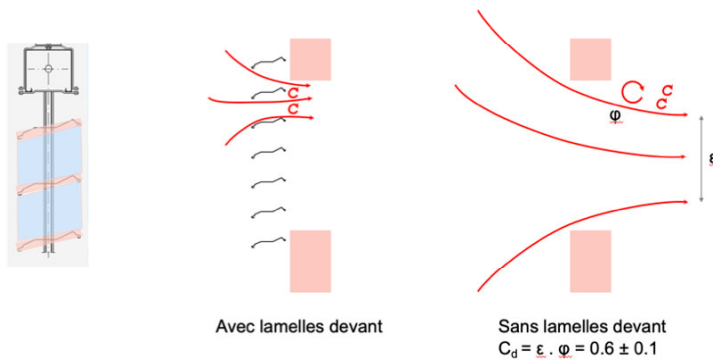


Figure 16 : Illustration schématique de différents effets qui influencent le coefficient de décharge d'une ouverture avec ou sans protection.

$$C_d^{store+ouv} = C_d^{ouv} \times C_d^{store} \quad (\text{Équation 7})$$

$$C_d^{store} = f_{géo}^{store} \times f_{\varepsilon, \varphi}^{store} \quad (\text{Équation 8})$$

Dans l'équation 7 nous avons :

- C_d^{store} = coefficient de décharge du store
- C_d^{ouv} = coefficient de décharge de l'ouverture (0.6 ou 0.63 dans la bibliographie pour une ouverture rectangulaire)



- $C_d^{store+ouv}$ = coefficient de décharge de l'ensemble « ouverture plus store ».

Il est commode d'exprimer le coefficient de décharge global de manière simplifiée comme un produit du coefficient de l'ouverture par le coefficient du store seul, car selon la stratégie de protection solaire, le coefficient de décharge du passage de l'air peut être celui de l'ouvrant seul ou celui de l'ouvrant + store.

Dans l'équation 8, nous avons :

- $f_{géo}^{store}$ = facteur de réduction géométrique du store, en d'autres termes le passage libre de l'air (bleu sur l'image),
- $f_{\varepsilon,\varphi}^{store}$ = facteur de freinage de l'air, qui par analogie avec le $C_d^{ouverture}$ dépend d'un facteur de rétrécissement des lignes de courant de l'air et d'un facteur de vitesse.

Le coefficient de vitesse φ dépend de la perte de charge créée par les turbulences lors du passage. Certes l'ensemble fenêtre + store génère des phénomènes aérauliques complexes qui sont peu étudiés et qui se superposent et modifient ceux de la fenêtre seule. Mais la mesure du débit d'air d'une fenêtre avec et sans protection nous permet de calculer les différents coefficients définis plus haut.

La mesure du coefficient de décharge des stores et d'une fenêtre mono-orientée avec la méthode du CO₂ donne des résultats assez stables. Le C_d mesuré de l'ouverture (0.62) est proche de la valeur théorique, ce qui augmente la crédibilité des résultats pour le cas avec store.

Ainsi, le coefficient d'une fenêtre ouverte partiellement avec un store orienté à 45° donne une valeur de $C_d=0.54$. Le C_d du store uniquement est de 0.85. Il est égal au facteur géométrique du store. Cela signifie que l'effet de vitesse du store, annule l'effet de rétrécissement du jet de la fenêtre libre.

Comme nous voyons sur la dernière colonne du tableau, le store fermé freine très peu le débit par rapport au store ouvert. Dans le cas d'une l'ouverture libre de 0.352 m² (1.56 X0.215), avec les stores relevés, le débit mesuré a été de 206 m³/h (correspondant à C_d 0.62), 183 m³/h avec les stores à 45° (C_d 0.54) et avec les stores fermés il y avait encore 168 m³/h (C_d 0.5).

Ce phénomène est dû au fait que le store est bien plus large que l'ouverture et qu'il est éloigné de 10 cm du vitrage. Ceci laisse un passage par les interstices et par le périmètre non étanche de 4 m² de store devant une ouverture de seulement 0.3 m². Ce phénomène sera confirmé aussi dans l'expérience avec les fenêtres traversantes.

	Ouverture sans store	Ouverture avec store 45°C	Ouverture avec store fermé
Débit d'air mesuré [m ³ /h]	206	183	168
Coefficient de décharge C_d fenêtre + store	0.62	0.54	0.50
C_d store uniquement		0.85	0.80

Tableau 9 : Mesure du coefficient store + fenêtre avec la mesure du débit d'air à partir de la mesure de la décroissance de la concentration de CO₂.



2.4.3.5 *Mesure du coefficient de décharge des stores devant la fenêtre en ventilation avec débit traversant.*

Afin de pouvoir mesurer l'effet d'un store à lamelles devant des ouvertures en ventilation traversante, nous avons cherché à créer une différence de pression quasi homogène devant l'ouvrant et le store. Pour cela, nous avons imaginé le dispositif expérimental suivant :

Nous avons choisi un après-midi du mois de novembre avec un ciel dégagé et un vent faible (0.8 - 1.8 m/s). Nous avons fermé toutes les fenêtres du bâtiment de référence, sauf une en haut du bâtiment (2^{ème} étage) et une en bas (rez-de-chaussée). Les deux ouvertures étaient orientées au nord.

Nous avons ensuite mesuré la vitesse de l'air entrant en bas et de l'air sortant en haut, toujours au milieu de l'ouverture. La vitesse de l'air sur toute la hauteur de la fenêtre était homogène car le niveau neutre se situait au milieu du bâtiment, à 3.5 m de distance de chaque ouverture (comme la vitesse varie avec le carré de la distance du niveau neutre, elle varie peut le long de l'ouverture). Sur la fenêtre du rez-de-chaussée nous avons reproduit toutes les configurations de store que nous souhaitions mesurer, (sans store, avec lamelles inclinées à 45°C, avec store fermé) et nous avons mesuré la vitesse de l'air au milieu de la fenêtre du haut sans obstruction.

Nous avons ensuite répété l'expérience en baissant le store de la fenêtre du haut afin de mesurer la vitesse de l'air à travers la fenêtre du bas sans store.

La mesure de la vitesse avec et sans store sur l'autre fenêtre, nous a permis de calculer le coefficient de décharge de la fenêtre avec store (nous mesurons toujours la vitesse dans une fenêtre sans store, car la présence du store rend la mesure à proximité aléatoire). Nous avons choisi la façade nord pour ouvrir les fenêtres car le vent venait de l'ouest, parallèlement à la façade, exerçant ainsi un impact plus faible que s'il venait en face ou en biais. Nous avons calculé le coefficient de décharge par rapport à la vitesse sans obstacle et non par rapport la vitesse théorique afin de diminuer l'effet des phénomènes parasite (vent, infiltration, complications géométriques, résistance des portes intérieures) car ces effets étaient exercés de la même façon sur les deux configurations. Les mesures de vitesse et de température ont été moyennées sur un pas de temps d'une minute. Nous avons évité de laisser les fenêtres ouvertes en dehors du temps de la mesure pour ne pas refroidir le bâtiment et garder des conditions stables et semblables tout le long de l'expérience. La dimension exacte de l'ouverture est de 1.56 X 0.64 m, soit 1 m².

En faisant ces mesures nous avons réalisé que l'effet du store devant la fenêtre dépend grandement du rapport $A_{\text{store}} / A_{\text{ouverture}}$. Un grand store n'a pratiquement pas d'effet géométrique devant une petite ouverture, surtout s'il est espacé de l'ouvrant.

Ces mesures ne peuvent donc pas être généralisées de manière précise. Elles doivent être prise avec précaution et consolidées avec d'autres hypothèses et données. Dans le cas précis que nous avons mesuré, les dimensions du store sont de 4 X 2 m, donnant un ratio de 8 avec l'ouverture complètement ouverte. Même avec le store entièrement fermé, nous avons observé qualitativement qu'il y a assez de passage pour ne pas trop freiner l'air qui passe par l'ouverture, ce qui est confirmé par les mesures tant en ventilation mono-orientée qu'en ventilation traversante.

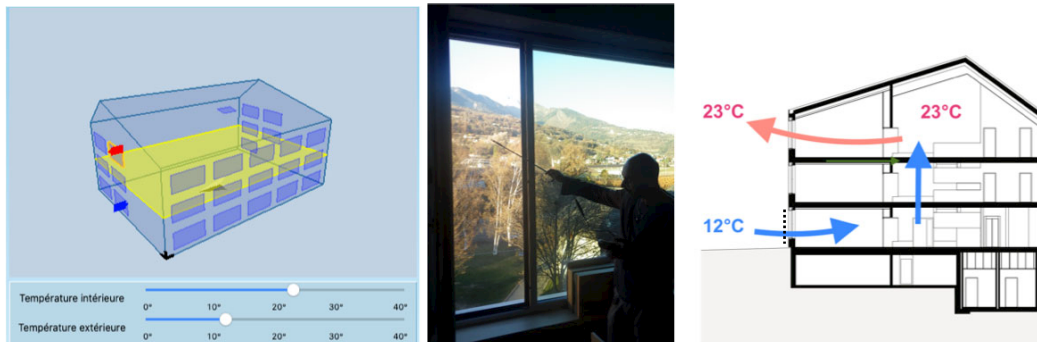


Figure 17 : Dispositif expérimental pour mesurer in-situ le coefficient de décharges de différentes configurations de stores en ventilation traversante. On ajuste la position du store à mesurer sur la fenêtre du bas, et on mesure la vitesse de l'air en haut au milieu de la fenêtre.

Avant de commencer les mesures nous avons vérifié l'effet du vent et des infiltrations sur chaque ouverture. Sur les ouvertures du bas nous avons un effet de tirage par les fuites de la toiture et des fenêtres du haut, alors que pour les ouvertures du haut nous avons l'effet plus important de la porte d'entrée coulissante en plus des ouvertures du bas.

La mesure de l'inétanchéité par pressurisation naturelle consiste à ouvrir une ouverture graduellement dans la partie inférieure du bâtiment jusqu'à commencer à obtenir de l'air qui sort en haut de l'ouverture. À ce moment, nous savons que le niveau neutre du bâtiment se trouve exactement en haut de la fenêtre, nous pouvons donc évaluer le débit de fuite. Si le bâtiment était complètement étanche, le niveau neutre se situerait au milieu de la fenêtre. En réglant la fenêtre de manière à n'avoir que de l'air qui rentre, nous savons que tout le débit de la fenêtre sort du bâtiment par les fuites.

Nous répétons l'expérience avec une ouverture en haut du bâtiment jusqu'à obtenir de l'air qui entre par le bas de cette ouverture. Avec le degré d'ouverture et sa hauteur nous pouvons calculer le débit de fuite dans la partie supérieure du bâtiment avec l'ouverture du bas et dans la partie inférieure du bâtiment avec l'ouverture du haut. Nous avons ainsi pu mesurer 7 à 8.5 cm d'ouverture de fuites dans l'ouverture du bas et 8.5 cm dans l'ouverture du haut.

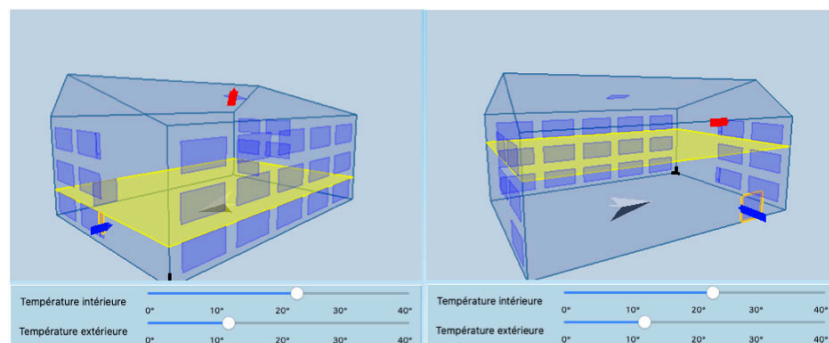


Figure 18 : Vérification de l'étanchéité avec la méthode du niveau neutre. On ouvre d'abord une ouverture en bas jusqu'à obtenir de l'air qui commence à sortir en haut puis une en haut jusqu'à obtenir de l'air qui entre en bas et on mesure le degré d'ouverture pour quantifier les fuites en haut et en bas du niveau neutre.

L'ouverture de 8.5 cm en haut avec ΔT 11°C donne un débit parasite de 259 m³/h et l'ouverture de 7-8.5 cm en bas donne 259-213 m³/h de fuite. Le débit de fuite reste négligeable en comparaison avec le débit d'air de la fenêtre ouverte qui représente 3072 m³/h avec l'ouverture 60X160 cm. Le débit parasite représente 6.9 - 8.4%. Cet ordre de phénomènes parasites, avec conditions réelles du bâtiment, en présence d'un léger vent et d'une température qui change, est satisfaisant. Le fait aussi que nous évaluons le C_d du store de manière relative par rapport à la situation sans store, où les mêmes



phénomènes parasites sont présents, diminue leur effet car les effets constants sont annulés. La première mesure du coefficient de décharge sans obstacle avec cette méthode a donné $C_d = 0.63$, valeur concordante avec la bibliographie et les autres mesures.

Position des stores	Conditions		Ouverture au rez-de-chaussée air entrant		Ouverture au 1er étage air sortant		Résultats	
	Heure	Text	Vitesse [m/s]	Temp. du local [°C]	Vitesse [m/s]	Temp. du local [°C]	C_d store entrant	C_d store sortant
ouverts	16:03	10.5	0.9	14.6	0.9	21.7	0.63	0.63
45°	16:05	10.6	0.9	14.0	0.7	21.6	0.69	0.44
fermés	16:17	10.1	0.7	14.3	0.4	21.0	0.38	0.20

Tableau 10 Mesure des coefficients de décharge avec et sans store devant les fenêtres.

Dans le tableau ci-dessus, nous pouvons observer que les résultats présentent de grandes variations. Ils sont cependant cohérents avec les résultats avec la méthode du CO_2 et la fenêtre mono-orientée.

1. Avec les stores complètement fermés, nous avons mesuré un coefficient de décharge du store + fenêtre de 0.38 entrant et 0.2 sortant.
2. Avec la fenêtre mono-orientée la mesure était de 0.5.
3. Avec les stores devant nous avons 0.69 et 0.44, par rapport à 0.54 pour la fenêtre mono-orientée.

Suite à ces mesures, nous pouvons donc recommander un C_d store + ouverture de 0.54 ± 0.1 avec les lamelles horizontales ou inclinées. Avec cette valeur et un C_d de l'ouverture uniquement de 0.63, le C_d du store revient à $C_d \text{ store} = 0.86$, ce qui correspond au degré d'ouverture laissée par le passage libre du store.

Avec les stores fermés tout dépend de la surface du store devant la fenêtre et du degré d'étanchéité de ce store, tant entre les lamelles que sur le périmètre du store. Avec un grand store à lamelles devant une petite fenêtre (ratio > 3 :1) nous pouvons prendre un $C_d = 0.3 \pm 0.1$.

2.4.4 Indicateurs de sensibilité

Les indicateurs de sensibilité ne sont rien d'autre que les indicateurs de confort et les indicateurs énergétiques évalués pour des scénarios présentant un ou plusieurs risques de déviation des performances. Chaque planificateur peut faire une analyse de risques liés à la conception du bâtiment, aux actions des utilisateurs, aux dysfonctionnements techniques, à sa localisation dans la ville, au changement climatique.

Nous présentons ici une liste non exhaustive de risques pour lesquels il peut être pertinent d'évaluer la sensibilité des indicateurs. Nous exposerons quelques cas d'évaluation de la sensibilité à ces risques dans le guide de conception.

2.4.4.1 Risques liés au concept architectural



- Fonctionnement partiel des protections solaires.
- Impossibilité d'ouvrir les fenêtres.
- Forme et taille des fenêtres insuffisante.
- Couverture de la masse thermique par l'équipement d'exploitation.
- Impossibilité de réaliser les trajets de l'air en raison de contraintes liées à l'exploitation ou à la sécurité incendie.
- Stores qui réduisent les ouvrants de ventilation ou qui préchauffent l'air entrant (stores en toile ou stores de couleurs sombre).
- Couleur des murs, des cadres de menuiseries, des vitrages absorbants (verres teintés) qui augmentent les gains solaires effectifs ou qui surchauffent l'air entrant.
- Double peau mal conçue qui surchauffe ou réduit l'air entrant.
- Surfaces vitrées trop exposées et mal protégées augmentant la température intérieure radiante ou les gains solaires effectifs.

2.4.4.2 *Risques liés à l'exploitation ou au comportement des utilisateurs*

- Non application d'une stratégie de ventilation manuelle.
- Suppression d'une stratégie de ventilation automatique à cause d'inconforts locaux ou de contraintes d'exploitation.
- Mauvaise utilisation de la protection solaire manuelle ou automatique.
- Obstruction des ouvrants ou des trajets de l'air.
- Gains internes trop importants.
- Exigences trop contraignantes (code vestimentaire, exigences sur la température).

2.4.4.3 *Risques techniques*

- Pannes du système de contrôle des ouvrants et non application d'une stratégie planifiée.
- Mauvaise conception, bugs ou erreurs de programmation dans les algorithmes de contrôle.
- Mauvaise position ou absence de capteurs de température, de CO₂ ou d'ensoleillement.
- Contradictions entre l'algorithme de réglage de la ventilation et les algorithmes de contrôle de la sécurité incendie, de la régulation des stores, du système de conditionnement d'air ou du chauffage, ou encore du système anti-effraction.
- Incompatibilité de systèmes (système radiant avec températures trop basses couplé avec la ventilation naturelle).

2.4.4.4 *Risques liés à l'environnement du bâtiment.*

- Environnement pollué (bruit, poussière, trafic, odeurs).
- Îlot de chaleur.
- Changement climatique.



2.5 Performances du rafraichissement par ventilation mécanique à la lumière des indicateurs de performance.

Lorsque l'ouverture des fenêtres ou aérateurs n'est pas possible durant la nuit (risque d'effraction, de dégâts dus à la pluie...), la ventilation mécanique peut être utilisée pour rafraichir les locaux hors utilisation mais elle consomme de l'énergie. Cette consommation supplémentaire est à mettre en comparaison avec l'apport de froid utile que procure cette solution. Plusieurs questions restent alors ouvertes sur ce sujet : l'apport réel et utile en rafraichissement, la consommation électrique supplémentaire, le débit optimal pour le fonctionnement du système, la durée de fonctionnement de nuit,... Faire fonctionner le système pendant plus de 700 heures supplémentaires rend l'ADV_{VC} de tous les systèmes de ventilation mécaniques inférieurs à 1. Pour limiter le nombre d'heures de fonctionnement, il faut développer de stratégies de régulation qui arrêtent le système lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est faible, ou lorsque le refroidissement est inutile. Nous pouvons aussi combiner la ventilation mécanique avec une ventilation naturelle soit pour les heures où la sécurité n'est plus un enjeu, soit pour des zones du bâtiment plus faciles à gérer (les circulations par exemple).

En règle générale, deux types de gestion de la ventilation mécanique nocturne sont possibles :

- Une ventilation basée sur un horaire de fonctionnement durant les périodes chaudes, par exemple débit standard fonctionnant toutes les nuits entre 2h et 4h du matin,
- Un enclenchement de la ventilation lorsque des conditions favorables de températures intérieures et extérieures sont présentes. Certains systèmes de régulation ne permettent pas d'appliquer cette deuxième stratégie.

2.5.1 Optimisation du fonctionnement sur horaire

En règle générale, les débits standards de jour sont aussi utilisés de nuit pour rafraichir le local ou alors ces débits peuvent être doublés pour un rafraichissement nocturne plus efficace. Il faut cependant faire attention à la courbe de fonctionnement des ventilateurs pour éviter de les faire fonctionner dans des zones avec un rendement de ventilation trop faible. Une surventilation est recommandée si le système reste dans la même gamme d'efficacité (vérifier le SPI du système au débit de ventilation hygiénique et au débit de fonctionnement en surventilation).

Des simulations de rafraichissement mécanique ont été effectuées avec les données météorologiques des trois villes suisses Genève, Zurich et Sion et appliquées au bureau test de l'école de Moréchon à Savièse. Celles-ci ont montré que cette stratégie est valable pour les affectations n'incluant pas une utilisation nocturne du bâtiment (bureaux, écoles).

Le premier résultat montre que la durée optimale pour le rafraichissement nocturne par ventilation mécanique est de 5 à 6 heures pour un débit standard et de 3 heures pour un débit doublé. Le rendement de ce système de rafraichissement par rapport à une climatisation standard dépend grandement du SPI (Specific Power Input) en W/(m³/h) du ventilateur, ainsi que du SEER du climatiseur avec lequel on se compare.

La Figure 19 montre la courbe d'équilibre de la consommation électrique pour le local de bureau avec le climat de Sion et un débit standard appliqué durant la période de 0h00 à 6h00 du matin.

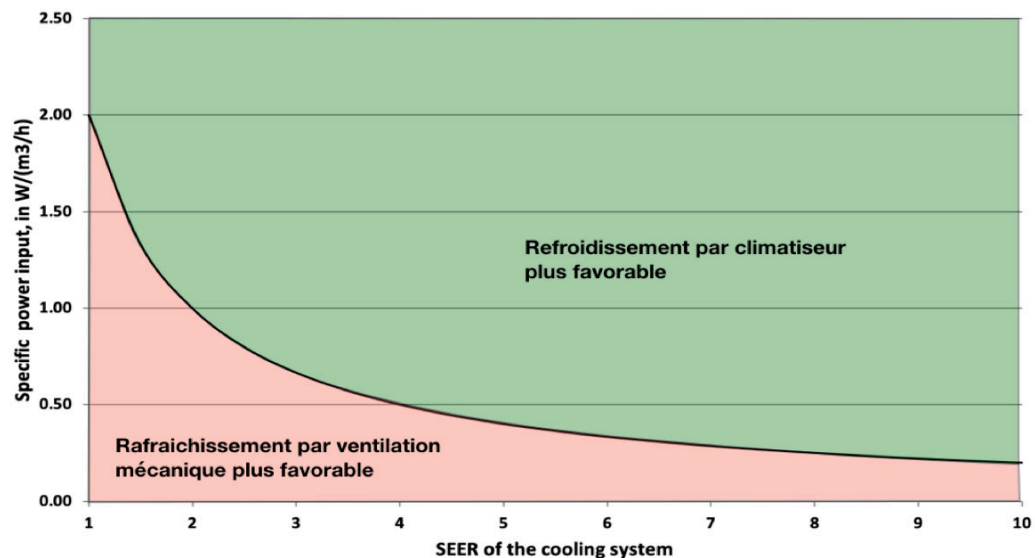


Figure 19 : Courbe d'équilibre de la consommation électrique entre un rafraîchissement par ventilation mécanique et un refroidissement par climatiseur. Si le point d'intersection du SPI du ventilateur et du SEER du climatiseur se trouve dans la zone rouge, le rafraîchissement par ventilation mécanique est plus favorable que celui par climatiseur.

Sur ce graphique, la courbe qui délimite la zone rose de la zone verte détermine les couples SPI /SEER pour lesquels la ventilation consomme autant d'énergie que la climatisation. On peut voir qu'un système avec un SPI de 0.5 équivaut à un climatiseur présentant un SEER un peu inférieur à 4. De même, Pour avoir un système avec un SEER > 8.5 et ainsi obtenir une classe équivalent A+++, il faut une consommation spécifique du ventilateur < 0.2 W/m³/h.

Si le système de ventilation du bâtiment est moins performant, il faut soit trouver une stratégie qui permet de diminuer les heures de fonctionnement, soit abandonner la stratégie de ventilation mécanique.

En utilisant le débit d'air doublé durant 3 heures entre 0h00 et 3h00 du matin, la nouvelle courbe tracée se situe légèrement au-dessous de la courbe actuelle de la Figure 19 (pour favoriser la lisibilité du graphique nous n'avons affiché que la première courbe).

En présence d'une climatisation dans le bâtiment, pour faire un choix en faveur de la ventilation plutôt que de la climatisation, il faut prendre une marge pour être en dessous de la courbe. La question de pose s'il n'y a pas de système de climatisation dans un bâtiment donné et que l'on doit choisir entre en installer un ou bien utiliser le système de ventilation pour surventiler. Dans ce type de cas, le dilemme devient délicat à trancher lorsque les performances de la ventilation placent le système dans la zone verte.

Si les planificateurs du système ne disposent pas de logiciel pour calculer les besoins de froid avec et sans surventilation (simulation dynamique), l'utilisation de la courbe de la Figure 19 donne une première indication. Nous avons ici affiché la courbe pour Sion, qui est un peu plus pessimiste que les autres stations météorologiques, afin de garder une marge de sécurité par rapport à la météo et par rapport aux conditions locales généralement observées dans les villes (températures souvent plus élevées que celles données par les stations météo officielles à cause du phénomène de l'îlot de chaleur).

Après avoir abordé la durée de la ventilation mécanique comme moyen de rafraîchissement des locaux, il convient de choisir les heures de la nuit auxquelles la température extérieure est la plus fraîche.



Nous avons effectué un grand nombre de simulations pour différentes stations météo et il en ressort que, pour la Suisse, on peut se baser sur un horaire pivot fixé à 3.00 du matin. Ainsi, une ventilation d'une durée de 2 heures devrait alors fonctionner entre 2h00 et 4h00 et une ventilation de 6 heures entre 12h00 et 6h00.

Cet horaire pivot n'a pas de sens dans le cas de la ventilation naturelle. En effet, il n'y a aucun intérêt à limiter les heures de ventilation, car une durée d'ouverture de fenêtres plus longue n'engendre pas de coût énergétique supplémentaire. Si en ventilation naturelle il convient de limiter les heures de ventilation pour des questions de sécurité, il est préférable de ventiler le matin que le soir.

Sachant que l'heure où la température intérieure s'égale avec la température extérieure se situe vers 11h00 du matin, il convient de favoriser aussi la ventilation matinale pendant les heures d'utilisation.

2.5.2 Régulation sur conditions de température

Parfois, la ventilation mécanique nocturne s'enclenche en fonction des conditions de température intérieure et extérieure. Les seuils doivent être définis de manière optimale pour limiter les heures de fonctionnement et éviter les heures où le rafraîchissement n'est pas efficace. Par exemple :

- Mise en marche si $T_{int} > 26.5^{\circ}$ et $T_{int} - T_{ext} > 2^{\circ}$
- Arrêt si $T_{int} < 20.5^{\circ}$ ou $T_{int} - T_{ext} < 2^{\circ}$

Les seuils de fonctionnement et d'arrêt sont généralement basés sur les limites du diagramme de confort EN ISO 7730, ce qui paraît tout à fait normal pour un local à climat contrôlé. Par contre la valeur pour le ΔT est choisie de façon arbitraire. En augmentant cette valeur, l'impact du rafraîchissement, ainsi que le nombre d'heures de fonctionnement (et donc la consommation électrique) diminueront.

Il a été trouvé que la mise en place d'un ΔT de 4° entre l'intérieur et l'extérieur est favorable au fonctionnement du système.

Prenons l'exemple de notre bureau test avec le climat de Sion :

Avec un ΔT de 2° , la réduction des besoins de froid est de 78% et le nombre d'heure de fonctionnement de 2820 heures. Pour un ΔT de 4° , la réduction des besoins de froid est de 77% avec 2435 heures de fonctionnement.

2.5.3 Ventilation naturelle ou mécanique ? horaire ou sur température ?

Nous avons simulé le CRR et E_{vc} pour deux scénarios de ventilation naturelle (seulement pendant l'occupation ou 24/24) et pour deux stratégies de ventilation mécanique optimales (débit hygiénique sans augmentation du débit entre 0h00 – 6h00 d'une part, et ventilation si $\Delta T > 4^{\circ}C$ d'autre part) pour le bureau du bâtiment de référence à Savièse. Nous présentons les résultats en énergie sur la Figure 20. Les besoins de froid sont réduits de 61%, respectivement de 97% avec une ventilation naturelle optimale durant l'occupation, respectivement 24 heures sur 24.

Il apparaît évident que la ventilation naturelle doit, dès que possible, être intégrée au bâtiment en prenant compte les risques liés à la sécurité et aux potentielles dégradations liées à la pluie et au vent. Si cela n'est pas suffisant ou acceptable, par exemple lorsqu'il y a des craintes d'effraction, l'utilisation du système de ventilation existant permet d'améliorer le confort intérieur en rafraîchissant durant la nuit les locaux. Mais ceci n'est pas gratuit. En rouge on voit la consommation d'énergie électrique.

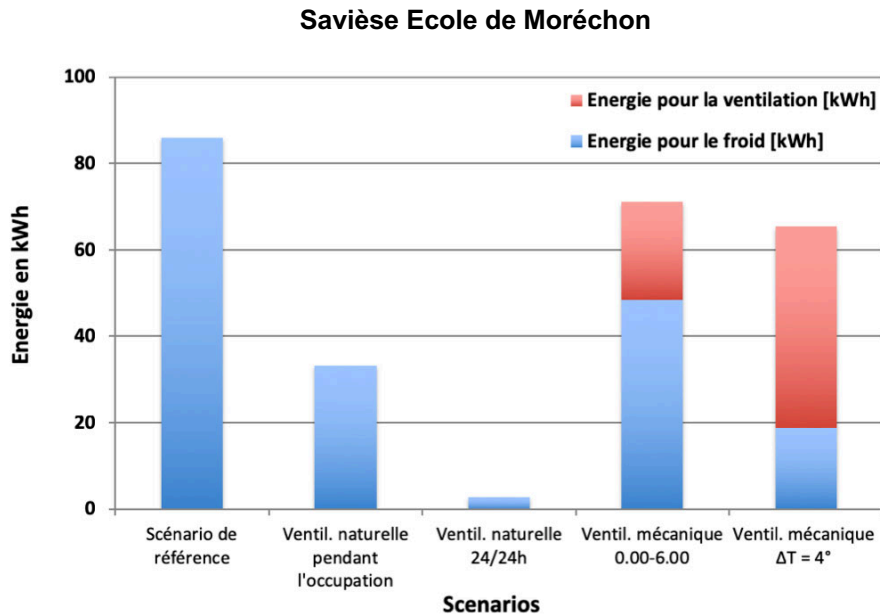


Figure 20 : Graphique de l'énergie finale des différents scénarios séparée en énergie pour le froid (bleu) et pour la ventilation (rouge) pour un SEER du système de froid de 4 et un SPI du système de ventilation de 0.3 W/(m³/h)

Avec les caractéristiques techniques du climatiseur et du ventilateur telles que décrites plus haut, la stratégie de rafraîchissement par ventilation mécanique avec enclenchement en fonction des conditions de températures intérieure et extérieure est plus efficace que celle avec un fonctionnement sur horaire. Les heures comptées de nuit pour la ventilation mécanique sont cependant plus élevées : 1659 heures contre 810 pour le fonctionnement sur horaire. Le choix de la variante la plus efficace dépend donc presque uniquement de l'efficacité des installations techniques en place.

La stratégie couramment rencontrée qui consiste à interdire aux utilisateurs d'ouvrir les fenêtres pour éviter de faire entrer de l'air chaud dans le bâtiment **est clairement fautive**. Nous avons vu précédemment (Figure 5) que pendant les heures de fonctionnement, nous avons entre 74 heures à la Chaux-de-Fonds et 193 heures à Genève où la température extérieure dépasse 26°C. Dans le graphique de la Figure 8 on voit que l'ouverture des fenêtres réduit de 38 à 56% les besoins de froid dans les centres urbains et de 84% à la Chaux-de-Fonds (CRR).

La source de la surchauffe n'est donc pas principalement liée à la température de l'air extérieur mais plutôt à l'ensoleillement. Il arrive ainsi que le soleil réchauffe indirectement l'air avant que celui-ci ne pénètre dans le bâtiment (par exemple dans le cas d'un aérateur avec protection grise, dans le cas d'un store à lamelles couleur anthracite ou dans le cas d'un store en toile sombre). Ces cas seront traités dans le paragraphe « indicateur de risque » dans le chapitre suivant avec le guide de conception.

2.5.4 Performance des ventilateurs plafonniers

Le CRR peut aussi être utilisé comme indicateur de composant pour évaluer la réduction des besoins de froid liée à l'utilisation d'un composant spécifique, comme un ventilateur plafonnier.

Pour évaluer la contribution d'un ventilateur plafonnier à la réduction des besoins de froid, nous avons simulé les besoins non pas à 26°C, ce qui constitue la consigne du scénario de référence, mais avec une consigne de 29°C. En effet, selon la norme SIA 180, une vitesse d'air comprise entre 0.8 et 1.0 m/s permet de décaler de 3° la température ressentie de confort.

Dans un local équipé d'un ventilateur plafonnier de bonne qualité, la température de 29°C correspond donc à une température ressentie de 26°C par un occupant en tenue d'été.

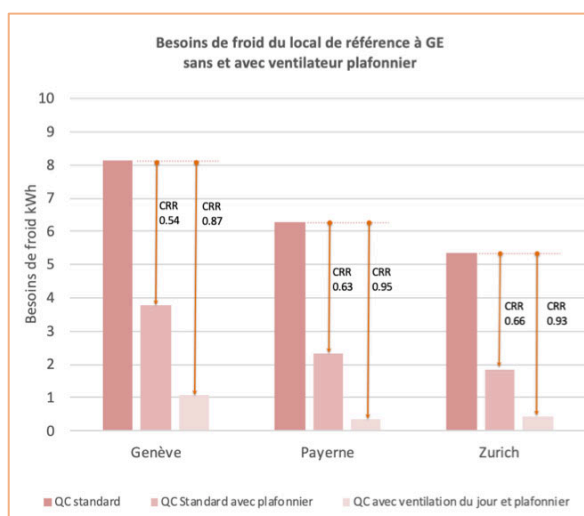


Figure 21 : Besoins de froid et CRR de l'utilisation d'un ventilateur plafonnier avec et sans possibilité d'ouverture des fenêtres pour le local de référence.

Comme on peut le constater sur la figure ci-dessus, l'utilisation d'un ventilateur plafonnier est très efficace. Même sans la possibilité de ventiler naturellement pendant l'utilisation, le CRR varie entre 0.54 et 0.66 pour les centres urbains du plateau et de la région lémanique.

La combinaison d'un ventilateur plafonnier avec une stratégie de ventilation du jour donne des CRR entre 0.87 et 0.93, ce qui est du même ordre que l'application d'une stratégie de ventilation de nuit.

Nous avons aussi simulé la combinaison d'une stratégie de ventilation de nuit avec l'utilisation de ventilateurs plafonniers et les besoins de froid sont réduits à zéro, ce qui donne un CRR de 1 pour toutes les villes. Cette solution est donc prometteuse pour les bâtiments de haut standard énergétique en Suisse, et pourrait constituer une alternative très avantageuse dans les cas où l'application d'une stratégie de ventilation nocturne est exclue par les contraintes d'usage. De la même façon que nous avons utilisé l'indicateur CRR pour évaluer l'efficacité d'un ventilateur plafonnier, on peut l'utiliser pour d'autres stratégies de ventilation (ventilation adiabatique, puits canadiens etc.).



3 Étude paramétrique de refroidissement par ventilation

Forts d'un ensemble consolidé d'indicateurs de confort et d'indicateurs d'énergie et disposant d'un immeuble de référence et d'un logiciel de simulation dynamique robuste et validé, nous pouvons réaliser une analyse paramétrique du refroidissement par ventilation et comparer les performances avec d'autres stratégies de refroidissement, y compris la climatisation.

Le but de cette analyse est d'utiliser les résultats de l'Annexe 62 pour faire un zoom sur les conditions climatiques et normatives suisses et répondre à deux questions :

- Est-il possible de se passer complètement de la climatisation active en utilisant une stratégie de refroidissement par ventilation ?
- Si oui, quels sont les facteurs d'influence, les risques et les limites de ces stratégies ?

La méthode que nous allons utiliser consiste à prendre 3 affectations du cahier technique SIA 2024, avec leurs caractéristiques thermiques et d'utilisation standard et d'appliquer les stratégies de refroidissement par ventilation du bâtiment de référence, pour faire varier les facteurs d'influence, et évaluer les indicateurs de performance.

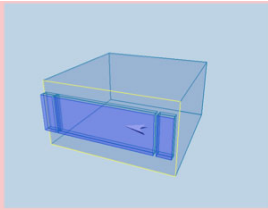
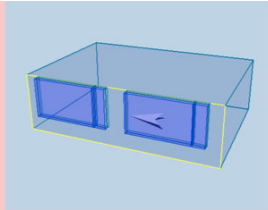
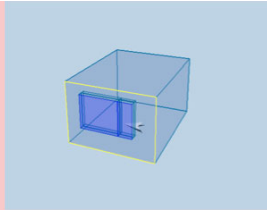
	A. Bureau	B. Salle d'école	C. Logement
			
Dimensions	6X6	10X7	4X5
Vitrages	50%	50%	30%
Ouvrants	2 fois 0.6X1.6	2 fois 0.6X2	0.6X1.3
$q_{\Delta T5^{\circ}\text{C}}$ [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$]	18.7	9.6	12.3
Capacité thermique	Moyenne	Moyenne	Elevée
Gains _{int.} [Wh/m^2]	153	266	96

Figure 22 : Locaux standards à analyser.

Les caractéristiques thermiques sont les mêmes que ceux décrits dans le Tableau 2 et les dimensions des locaux sont celles des locaux standards SIA 2024 A : 5.00 x 8.00, B : 10.00 x 8.00 et C : 15.00 x 8.00.

Chaque fenêtre mesure 4.00 x 2.00 avec une partie ouvrable 0.6 x 1.60 pour les affectations bureau et école, ce qui donne un $q_{\Delta T5^{\circ}} = 337 \text{ m}^3/\text{h}$ par ouvrant. Pour l'affectation logement, la fenêtre mesure 0.6 x 1.3 avec un $q_{\Delta T5^{\circ}} = 247 \text{ m}^3/\text{h}$.

Les gains internes journaliers selon les conditions d'utilisation standard de SIA 2024 sont de 153 Wh/m^2 pour les bureaux, 266 Wh/m^2 pour les salles d'école et 96 Wh/m^2 pour les logements. L'application stricte de la SIA 382/1 selon le critère des gains internes rendrait la climatisation souhaitable pour



l'affectation bureau et nécessaire pour l'affectation salle d'école. Ce critère simple est trop strict (les normes en règle générale prennent de la marge avec les critères simplifiés) et il est préférable d'utiliser la norme SIA 180 et vérifier la condition de confort par simulation.

Dans [6], une analyse de sensibilité des paramètres d'influence du refroidissement par ventilation montre en premier lieu les gains solaires, puis les gains internes, le degré d'ouverture de la fenêtre. Pour les régions ventées, ce qui n'est pas le cas de la Suisse, le vent est aussi un paramètre important d'influence. En revanche, les paramètres comme la valeur U des parois et du toit, pour peu qu'elles respectent les exigences légales actuelles, ne jouent plus un rôle important. Nous nous sommes inspirés de cette étude pour choisir les paramètres à varier pour les locaux standard dans les conditions standard et la météo suisse. Avant de faire varier les paramètres, nous avons calculé les indicateurs de 3 affectations les plus courantes. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel DIAL+.

3.1 Indicateurs de confort et CRR pour les affectations bureau, salle d'école et logement collectif.

	À bureau	B école	C logement
Besoins de froid cible SIA 2024	10.8	16.9	6.5
Besoins de froid standard DIAL+	9.9	11.8	6.4
Heures de surchauffe* V_0	902	738	1909
Heures de surchauffe* V_j	40	214	0
Heures de surchauffe* V_n	0	34	0
CRR V_j	0.73	0.41	0.98
CRR V_n	0.92	0.69	1.00

* heures de surchauffe selon la norme EN 13521

Figure 23 : heures de surchauffe et CRR pour les principales stratégies de ventilation naturelle

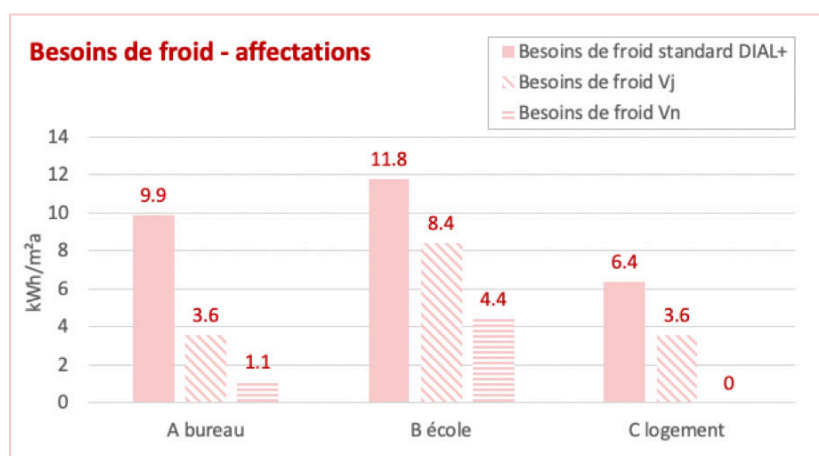


Figure 24 : Besoins de froid de 3 stratégies de ventilation pour les affectations bureau, école, logement



Comme on peut le voir ci-dessus, sans ouverture des fenêtres (V_0) il y a entre 738 et 1909 heures en dehors de la zone de confort pendant les heures d'utilisation (pour le logement il y a beaucoup plus d'heures d'utilisation).

La stratégie d'ouverture pendant le jour (V_j) réduit drastiquement les heures d'inconfort, et la stratégie de ventilation jour et nuit (V_n) supprime pratiquement toutes les heures en dehors de la zone de confort (à part pour l'affectation salle d'école, où le nombre des personnes est important et la température opérative se situe à la limite de la zone de confort avec un nombre d'heures d'inconfort très faible (34).

La réduction des besoins de froid est aussi très significative, dans la mesure où la ventilation nocturne supprime pratiquement tous les besoins de froid sauf pour l'affectation salle l'école. En plus de gains internes plus importants, pour cette affectation la taille des ouvrants (2 ouvrants de 0.5m x 1.6m) est faible. Certains des professeurs de l'école ont fait cette remarque (il manque d'air quand il fait chaud). Un des paramètres que nous allons donc faire varier par la suite est la taille et le nombre des ouvrants.

Comme on voit sur le graphique, pour l'affectation logement collectif il suffit de pouvoir ouvrir la fenêtre et le confort est assuré.

Influence de l'affectation.

- Le comportement thermique des locaux est fortement dépendant de l'affectation
- Pour toutes les affectations, une stratégie de ventilation convenable rend la climatisation superflue.
- Si la ventilation jour et nuit est impossible, la ventilation du jour réduit fortement les besoins de froid.

3.2 Influence du climat et du microclimat

3.2.1 Effet du climat en Suisse

Dans le passé et dans la bibliographie nous trouvons une caractérisation du potentiel de refroidissement du climat selon les conditions météorologiques sans tenir compte des besoins du bâtiment. Une innovation de l'Annex 62 est d'évaluer ce potentiel en considérant aussi le bâtiment. Ceci consiste à simuler un bâtiment selon les conditions climatiques et d'évaluer les indicateurs de performance. Avec notre introduction d'indicateurs de performance, en plus du potentiel d'un climat à apporter le confort (calcul des heures dans la zone et en dehors de la zone de confort), nous pouvons évaluer le potentiel d'un climat à réduire les besoins de froid pour les locaux climatisés. Ceci peut changer les pratiques actuelles qui ont tendance à rendre les bâtiments climatisés obligatoirement fermés sans possibilité d'ouvrir les fenêtres.

Nous avons évalué les indicateurs de confort et le CRR pour l'affectation bureau pour 6 villes typiques de la Suisse. Pour caractériser le climat de ces villes avec un indicateur unique, nous avons calculé le nombre d'heures où la température extérieure est supérieure à la température de confort selon la norme ISO 7730 (la plupart du temps $> 26.5^{\circ}\text{C}$). Le faible nombre d'heures en dehors de la zone de confort (même de la ISO 7730 qui est plus stricte ne considérant pas la possibilité d'adaptation du corps) montre d'une part le potentiel de refroidissement par ventilation, et d'autre part indique que les problèmes de confort thermique estival pour tous les climats suisses est principalement une question de mauvaise gestion de la protection solaire et de la conception des ouvertures pour la ventilation.



	Genève	Payerne	Zurich	Sion	Lugano	La-Chaux-de-Fonds
Heures avec $T_e > \text{ISO 7730 } (26^\circ\text{C})$	193	105	82	174	161	24
Jours d'été (Meteosuisse max $\geq 25^\circ\text{C}$)	60	47	48	68	66	13
Jours tropicaux (Meteosuisse max $\geq 30^\circ\text{C}$)	15	8.1	9.1	16	8.1	0.3
Heures de surchauffe* V_0	902	880	779	983	1007	396
Heures de surchauffe* V_j	40	4	11	30	30	0
Heures de surchauffe* V_n	0	0	0	0	0	0
Heures de surchauffe* $V_m \cdot q_{\text{SIA2024}} \times 1$	177	50	68	104	305	0
Besoins de froid standard DIAL+	9.9	7.4	6.4	9.8	12.4	1.9
CRR V_j	0.73	0.84	0.80	0.63	0.38	0.98
CRR V_n	0.92	0.95	0.94	0.89	0.80	1.00
CRR $V_m \cdot q_{\text{SIA2024}} \times 2$	0.78	0.85	0.81	0.81	0.66	0.95

Tableau 11 : Indicateurs de confort et indicateurs énergétiques pour l'affectation bureau et 4 stratégies de ventilation pour 6 stations météorologiques selon Meteonorm (année typique 1981-1991)

Comme nous pouvons voir sur le tableau ci-dessus, même bien protégé avec de bons stores, un bureau passe d'une à deux centaines d'heures de surchauffe à environ plusieurs centaines, voire mille, pour les principales villes suisses, sauf pour les localités à la montagne, où même là il y a quasi 400 heures de surchauffe. C'est la confirmation de la première hypothèse au début de ce document, affirmant que les bâtiments modernes n'offrent pas un élément dissipatif de la chaleur estivale. Rien que l'ouverture de la fenêtre pendant les heures d'utilisation réduit les heures d'inconfort et les besoins de froid de manière très significative. Une surventilation nocturne (V_m) seule n'apporte pas suffisamment de réduction des besoins de froid et laisse des heures d'inconfort. Malheureusement, il n'y a pas de logiciel, à notre connaissance, qui permet de simuler de manière combinée une ouverture des fenêtres pendant les heures d'utilisation et une surventilation nocturne par le système de ventilation.

La ventilation naturelle nocturne, dans toutes les stations météo, offre un confort suffisant pour le local type étudié.

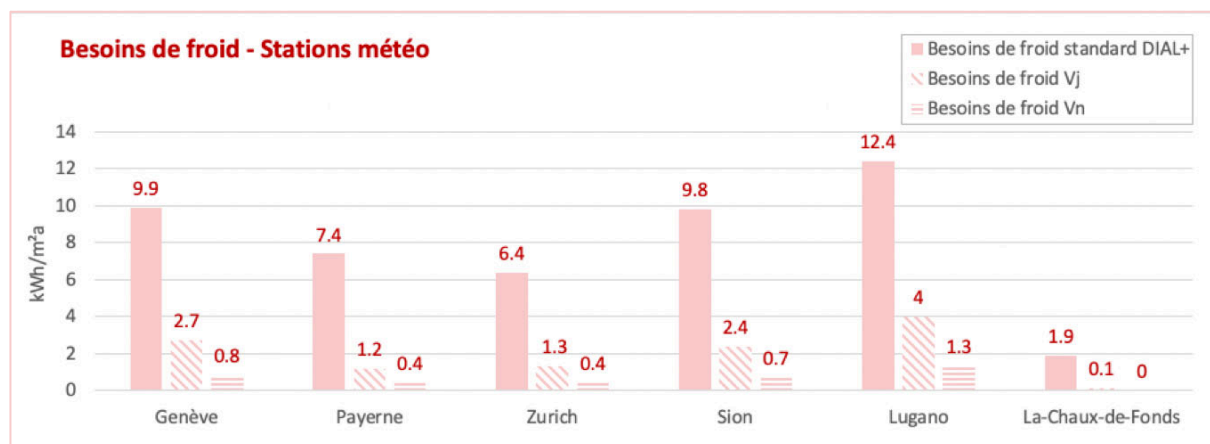


Figure 25 : Besoins de froid pour 6 stations météorologiques suisses. A part les deux extrêmes du climat de montagne, les stratégies de refroidissement par ventilation présentent un potentiel similaire très important.

3.2.2 Effet du microclimat

Depuis trois-quatre décennies, un bon nombre d'études sur le microclimat de villes suisses et européennes ont vu le jour, [31],[32]. Les premières études se limitent à l'analyse phénoménologique de l'îlot de chaleur et les modèles les plus poussés se focalisent sur le calcul de la température des surfaces et de l'air urbain à un instant donné, présentant les résultats sous forme d'une carte avec la distribution spatiale des températures [34]. Avec les puissances de calcul, des modèles dynamiques commencent à voir le jour [33] avec prédictions d'un degré de crédibilité acceptable. Mais nous sommes encore loin de pouvoir simuler des conditions météorologiques locales et de les utiliser comme input de logiciels de simulation dynamique de bâtiments. La référence reste toujours la météo du site de référence d'une ville. Une idée intéressante proposée par Tsoka [36], [37] consiste à simuler un quartier avec un logiciel de type Envimed et produire de températures mensuelles moyennes et extrêmes pour toutes les localités d'une ville à partir du fichier météorologique de référence et de les valider par des mesures réelles sur quelques localités. Puis d'introduire ces résultats mensuels dans le logiciel Meteonorm et produire des fichiers propres à un endroit de la ville. Mais même si nous mettions l'énergie et le temps pour une telle opération, les différences pour un même bâtiment au rez-de-chaussée et au troisième étage sont tout autant significatives.

Pour quantifier l'effet de l'îlot de chaleur sur les stratégies de ventilation, nous avons pu trouver de fichiers météo avec mesures réelles complètes (température, rayonnement) sur 3 sites à Genève et nous avons calculé les indicateurs de confort et les indicateurs énergétiques en simulant le bureau de référence SIA 2024 avec le logiciel DIAL+ comme pour les autres paramètres d'influence. Les données climatiques urbaines sont pour l'année 2018. En plus de la station « Genève Cointrin » où Meteosuisse met à disposition les mesures, nous avons les données pour, Rue de la Prairie, à l'Ecole d'Ingénieurs du canton, qui se trouve dans un environnement urbain dense et pour Batelle, dans les installations de l'université au sud de Carouge qui se trouve aussi en périphérie à l'autre extrémité de la ville que l'aéroport.

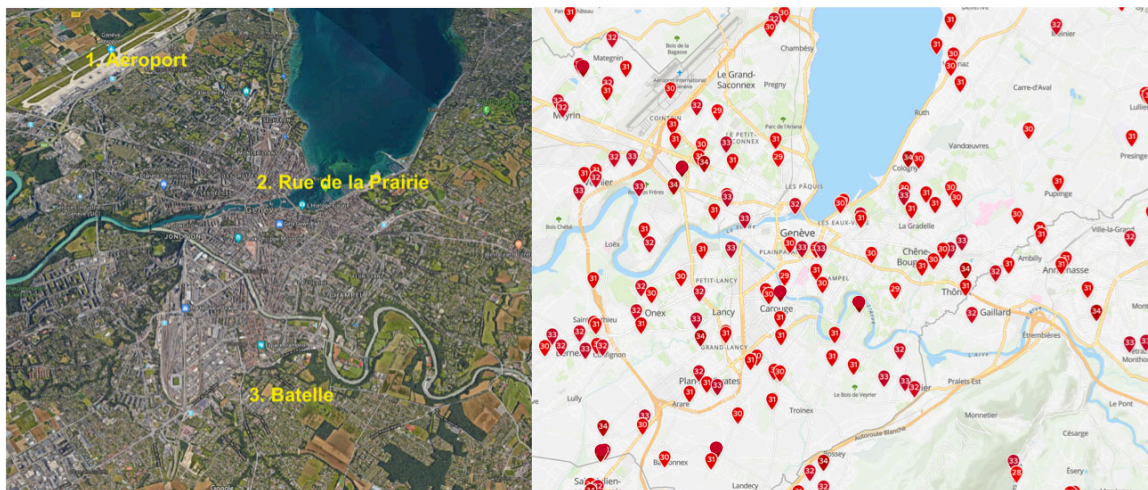


Figure 26 : Localisation des sites météorologiques étudiés à Genève et mesures de températures extérieures chez les particuliers par leur station météorologique privée partagée sur netatmo.com un jour de canicule.

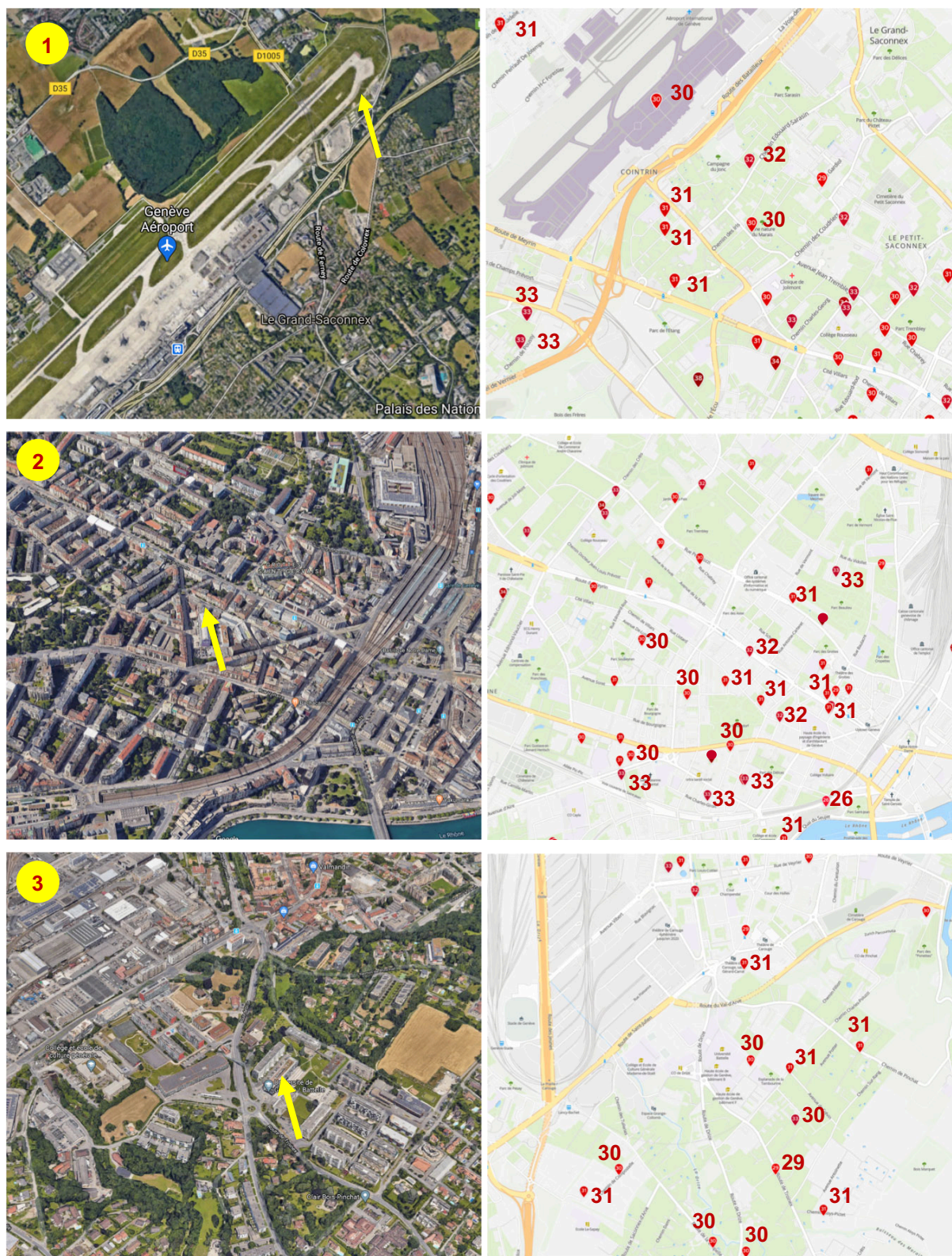


Figure 27 : Situation urbaine des trois sites météorologiques analysés et valeurs indicatives des stations privées connectées dans les alentours.



Malgré le caractère indicatif des températures des stations météo privées, partagées sur netatmo.com, et malgré les erreurs inhérentes à ces appareils qui peuvent être mal placés au soleil ou près d'un mur qui emmagasine la chaleur, nous pouvons observer que dans la zone centre, et au sud-ouest de la ville, dans la zone Lancy – Bernex Confignon les températures sont plus élevées (sur les cartes nous avons caché quelques mesures aberrantes où de manière évidente le capteur est exposé au soleil). La faible variation de la température du jour en fonction des caractéristiques urbaines est en accord avec les mesures réelles où l'on voit de manière évidente uniquement une variation pour les températures minimales nocturnes. Lors d'un jour de canicule, nous observons une température minimale de l'ordre de 20°C à l'aéroport et de 22-24°C à Rue de la Prairie. Un comportement du climat urbain lors d'un épisode de canicule similaire à celui montré sur la Figure 28 a été simulé et observé pour 3 stations météorologiques de ville à Bâle par Wicki et al [33], où nous avons de températures de l'air plus élevées plutôt la nuit. Une étude très complète de meteosuisse sur 5 villes suisses démontre le même phénomène [35] pour Lausanne, Zurich, Bâle et Berne, où ils n'ont pas pu mesurer une augmentation de la température diurne ou une augmentation du nombre de jours tropicaux, mais une augmentation de nuits chaudes avec $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$.

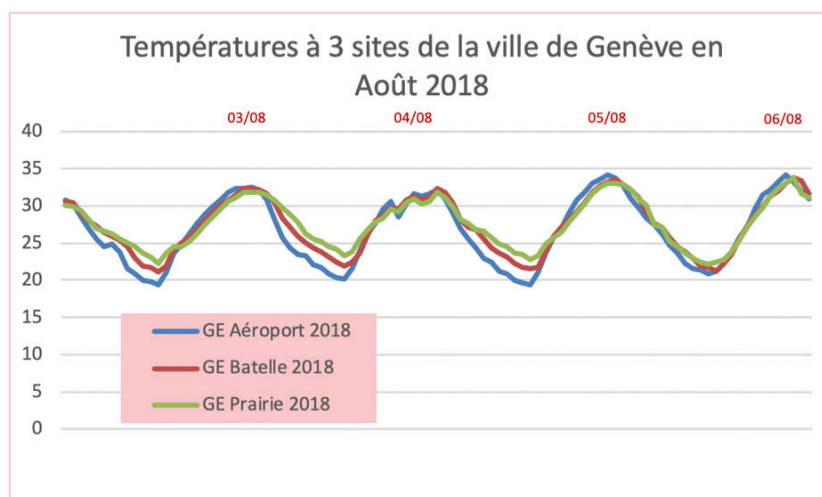


Figure 28 : Trois stations météo dans le Canton de Genève pour analyser l'impact de la localisation dans la ville sur les indicateurs de confort et les indicateurs d'énergie.

	Meteonorm			Mesures		
	Cointrin Moyenne 1981-91	Cointrin Moyenne 91-2010	Cointrin max été 91-2010	Cointrin 2018	Prairie 2018	Batelle 2018
Température moyenne annuelle	9.9	11.0	12.1	12.3	13.0	12.9
Température maximale	30.9	33.6	35.0	34.1	33.8	33.8
Heures $\geq 26^{\circ}\text{C}$	161	275	567	453	459	481
Jours estivaux $T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$	35	51	78	82	73	77
Jours tropicaux $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$	3	6	21	28	21	24
Nuits tropicales $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$	2	4	15	1	14	7
J $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ et $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$	1	1	9	1	11	7

Tableau 12 : Statistiques de température pour la station météo de référence pour 3 sites urbains à Genève.



Avec toutes ces observations réelles, nous sommes loin des exagérations non fondées parlant d'îlots de chaleur de l'ordre de 5 ou de 7°C à Genève, loin aussi de la perception que nous devrions climatiser toute la Suisse à cause des îlots de chaleur urbains. Par ailleurs, l'idée que l'aéroport est une zone de campagne, ou que tout le centre est une zone urbaine dense, est à relativiser surtout dans une ville au bord du lac avec deux fleuves qui la traversent. Sur le Tableau 12 nous observons une augmentation de la température moyenne en général et des jours de canicule ($T \geq 30^\circ\text{C}$) les 4 dernières décennies, mais nous n'observons pas une augmentation de la température du jour en été au centre-ville par rapport à l'aéroport Cointrin. L'année 2018, dont nous disposons des mesures réelles pour les 3 sites, ressemble plus au scénario maximal de Météonorm qui prend pour juin et pour août les températures de l'année de la grande canicule de 2003. Mais ce phénomène qui est communément appelé « vagues de chaleur » et qui devient de plus en plus fréquent sera analysé au chapitre suivant. En ce qui concerne « l'îlot de chaleur », la différence entre Genève Cointrin et les sites météorologiques universitaires de la rue de la Prairie et du site de la Batelle se situe plutôt au nombre de nuits tropicales (avec $T \geq 20^\circ\text{C}$). Nous avons 14 nuits tropicales à la Prairie au lieu d'une à Genève Cointrin et 7 à la Batelle. Ceci rend l'évaluation de l'efficacité de stratégies de ventilation plus pertinente, afin de quantifier l'effet réel de ces phénomènes du climat urbain, car nous misons sur la fraîcheur nocturne pour combattre la chaleur diurne.

	Genève Cointrin 1991-2010	Genève Cointrin 2018	Genève Prairie 2018	Genève Batelle 2018
Heures avec $T_e > 26^\circ\text{C}$	275	453	459	481
Heures de surchauffe* V_0	902	1014	1025	1026
Heures de surchauffe* V_j	40	87	54	71
Heures de surchauffe* V_n	0	0	0	0
Heures de surchauffe* $V_m q_{\text{SIA}2024} \times 1$	177	246	335	317
Besoins de froid standard DIAL+	9.9	12.4	13.2	13.1
CRR V_j	0.73	0.57	0.61	0.60
CRR V_n	0.92	0.86	0.83	0.85
CRR $V_m q_{\text{SIA}2024} \times 2$	0.78	0.66	0.59	0.63

Tableau 13 : Indicateurs de performance pour trois stations météorologiques dans le canton de Genève en 2018, comparés à ceux de la météo de référence « Cointrin 1991-2010 ».

Le tableau ci-dessus nous montre que le local de bureau de référence ne change pas beaucoup de comportement thermique en été de manière significative, même si nous passons d'une nuit tropicale pour le site de référence à 14 pour le site urbain dense du centre-ville. Les besoins de chaleur augmentent de 2.5 kWh/m² entre la météo de référence 1991-2010 et la météo de 2018 (année plus chaude que la moyenne en été), c'est 25% de manière relative, mais faible en valeur absolue. Nous rappelons que les besoins de froid de référence selon SIA 2024 sont de 12 kWh/m². Pour l'année 2018, les nuits chaudes augmentent les besoins de froid de 12.4 kWh/m² à Cointrin à 13.2 et 13.1 pour les sites urbains. C'est 6% de plus en valeur relative. Mais l'efficacité de la ventilation nocturne est suffisante pour rendre la climatisation non nécessaire pour un bureau qui peut être ventilé naturellement la nuit, quelle que soit sa localisation dans la ville. Pour la stratégie de ventilation du jour et pour la ventilation



mécanique nocturne nous voyons que le potentiel est même légèrement meilleur pour Prairie et Batelle, mais la situation reste pratiquement similaire.

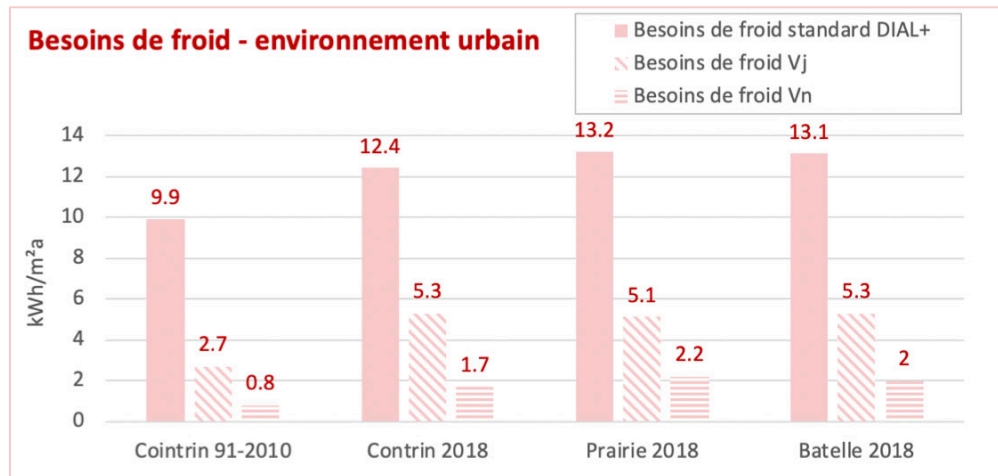


Figure 29 : Besoins de froid pour les différentes stratégies de refroidissement en fonction de la situation du local de référence dans le canton de Genève. Dans tous les cas, la ventilation nocturne est suffisante comme stratégie de refroidissement.

Il pourrait y avoir de situations particulières en ville, où il y a un réchauffement local significatif : la présence d'un grand parking goudronné à proximité d'un rez-de-chaussée, la situation particulière d'un canyon urbain non végétalisé, étroit et mal ventilé, etc. qui pourrait créer des conditions locales défavorables. Ces situations ne sont pas analysées, car elles restent marginales, et elles sont plus de l'ordre de l'étude de l'environnement immédiat du bâtiment plutôt que du phénomène de l'îlot de chaleur qui concerne l'ensemble de la ville. Comme nous calculons les indicateurs de confort sans tenir compte de l'influence du vent, tout phénomène microclimatique qui crée une brise fraîche (position par rapport aux vents dominants, position par rapport au lac ou aux rivières) restent des avantages supplémentaires par rapport aux stratégies analysées qui visent de rafraîchir la substance du bâtiment par l'usage de la ventilation.

Influence de la situation urbaine.

- Les températures estivales du jour malgré les croyances ne sont pas plus élevées en ville qu'à l'aéroport.
- Les températures minimales de nuit sont de 2 à 4°C plus élevées selon l'environnement urbain.
- Les besoins de froid en ville augmentent légèrement selon la situation urbaine
- Les stratégies de ventilation du jour et de nuit sont aussi efficaces au centre-ville ou en périphérie.

3.2.3 Les vagues de chaleur

Comme nous avons vu déjà en analysant le comportement du local de référence en 2018, le comportement thermique peut être sensiblement différent d'une année à l'autre. Le changement climatique rend les vagues de chaleur de plus en plus fréquentes. Celle de l'année 2003 est restée particulièrement marquante parce qu'elle était la première et la population et les services de la santé publique de pays concernés n'étaient pas préparés pour l'affronter. Les villes de Genève, Lausanne et Bâle ont enregistré jusqu'à 7% d'augmentation de la mortalité pendant les mois de Juin à Août où il y a



eu la grande canicule [38]. Le graphique suivant de MeteoSuisse, depuis la grande canicule de 2003 enregistre 5 années avec plus de 20 jours tropicaux et les trois dernières depuis 2017 elles sont consécutives. Les vagues de chaleur augmentent en nombre et en intensité.

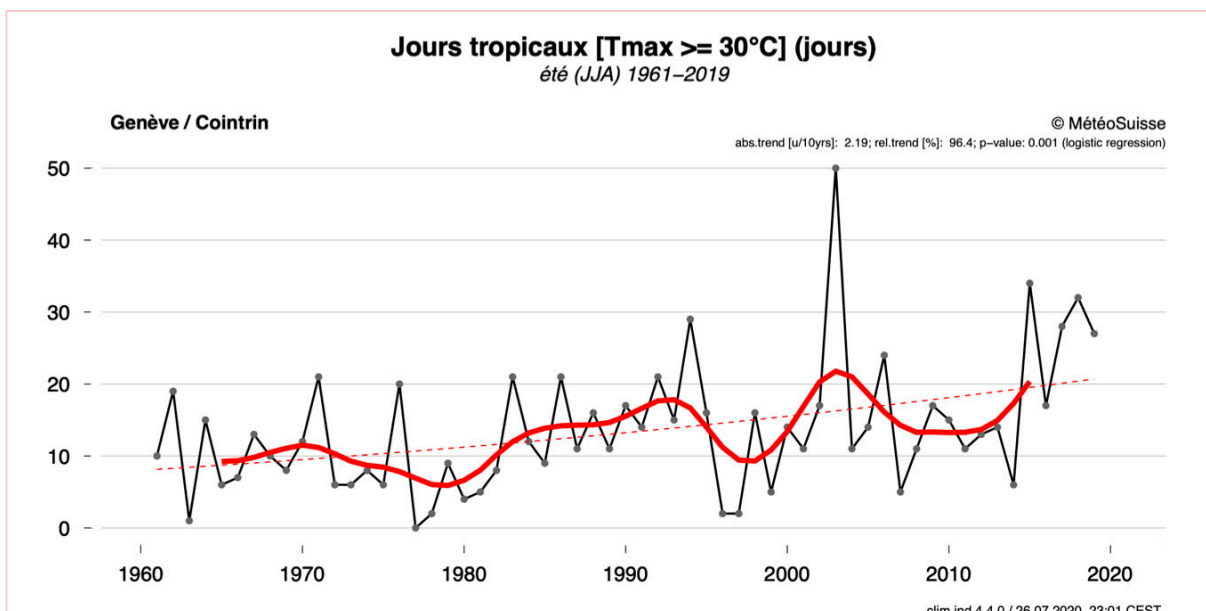


Figure 30 : Évolution du nombre de jours tropicaux par année à Genève Cointrin depuis 1960.

Pour analyser l'effet de vagues de chaleur nous simulons avec DIAL+ les indicateurs de confort et les indicateurs énergétiques pour les diverses stratégies de ventilation avec 4 fichiers météorologiques de meteonorm : 1981-1991, 1991-2010, valeurs maximales en été (juin 2003, juillet 1994, août 2003), et année 2018.

	Cointrin 81-1990	Cointrin 91-2010	Cointrin max été 91- 2010	Cointrin 2018
Heures avec $T_e > 26^\circ\text{C}$	161	275	567	453
Heures de surchauffe* V_0	863	902	1234	1014
Heures de surchauffe* V_j	21	40	231	87
Heures de surchauffe* V_n	0	0	0	0
Heures de surchauffe* $V_m q_{SIA} \times 1$	146	177	550	246
Besoins de froid standard DIAL+	8.6	9.9	17.8	12.4
CRR V_j	0.76	0.73	0.48	0.57
CRR V_n	0.91	0.92	0.78	0.86
CRR $V_m q_{SIA2024} \times 2$	0.74	0.78	0.57	0.66

Tableau 14 : Indicateurs de confort et indicateurs d'énergie pour le bureau standard 2024 pour analyser l'effet de vagues de chaleur avec 4 types d'années météorologiques du passé.



Comme on voit sur le tableau précédent, les vagues de chaleur affectent de manière significative le comportement estival du bâtiment. Avec un été comme celui de 2003 en juin – août les besoins de froid montent de 9.9 kWh/m² avec la météo « normale pour 1991-2010 » à 17.8 kWh/m², soit une augmentation de plus de 80%. En 2018, été qui ressemble à celui de 2019 et 2020 en termes de jours tropicaux, les besoins de chaleur montent de +25% se situant à 12.5 kWh/m². La ventilation du jour devient clairement insuffisante. Un bureau sans ventilation nocturne, avec ouverture des fenêtres uniquement pendant les heures d'utilisation (Vj) passe de 40 heures de surchauffe (encore supportable) à 231 avec une vague de chaleur comme celle de 2003 et 87 heures avec celles de 2018, 2019, 2020 (insupportable sans ventilateur plafonnier).

En revanche, et c'est positif, la ventilation de nuit reste une stratégie valable même avec la pire vague de chaleur malgré l'augmentation de la température moyenne du local.

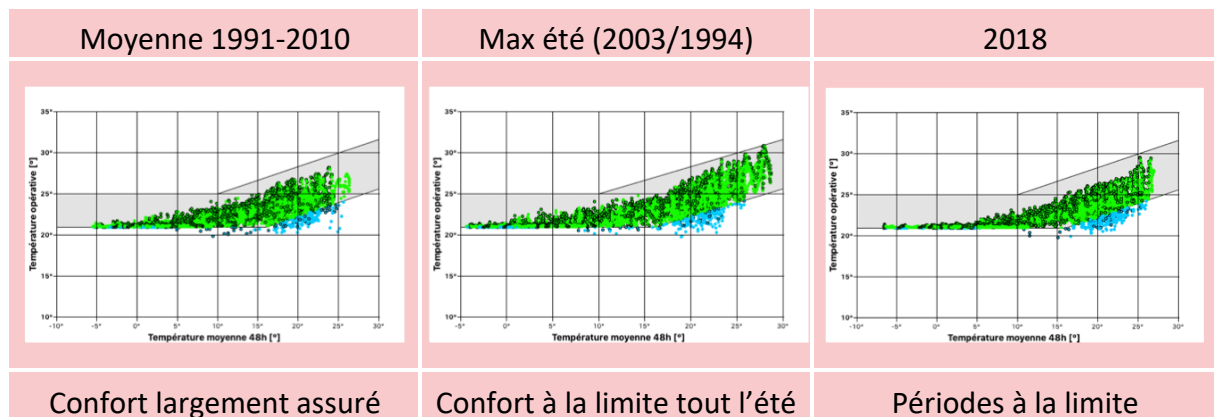


Tableau 15 : Diagramme de confort EN 13251 avec ventilation naturelle nocturne pour le refroidissement pour la météo standard et deux types de vagues de chaleur : une forte (2003/1994) et une moyenne (2018).

Si nous faisons un zoom sur une période de grande canicule avec jour et nuit tropicaux, nous pouvons voir que la température opérative maximale se situe entre 28°C et 31°C. Certes c'est 2 à 7°C plus bas que la température extérieure, mais c'est juste à la limite du confort.

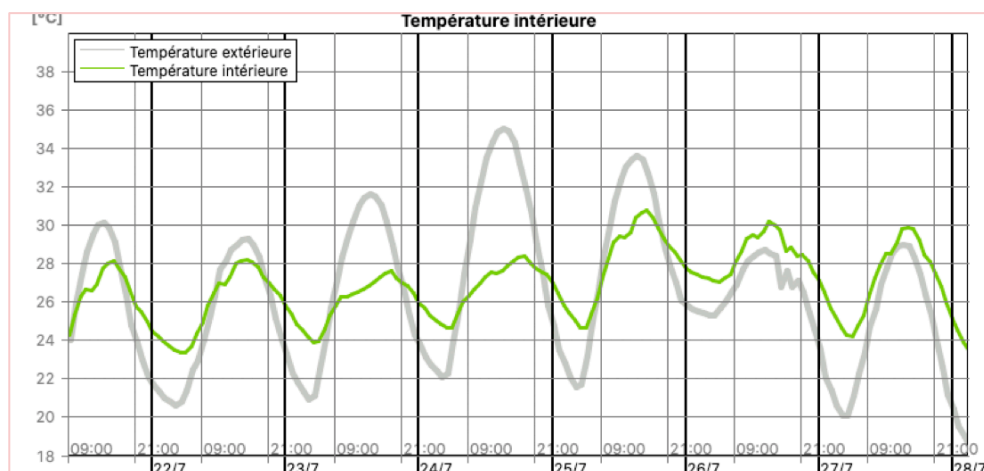


Figure 31 : Température intérieure opérative et température extérieure simulée avec DIAL+ une semaine sous une vague de chaleur de juillet 1994.

Bien qu'une stratégie de ventilation nocturne est capable d'apporter le confort à 100% de la période estivale pendant une vague de chaleur pour le local analysé, le fait de se situer à la limite de la zone

de confort rend le climat intérieur sensible à la moindre erreur d'utilisation : un peu plus de gains internes, une utilisation imparfaite des stores, une masse thermique couverte par le mobilier, un rayonnement supplémentaire par un grand écran face à l'utilisateur peuvent basculer le confort hors de la zone définie par la norme SIA 180. Comme ces épisodes de vagues de chaleur deviennent de plus en plus fréquents et intenses avec le changement climatique, il est souhaitable de prendre de mesures passives ou hybrides complémentaires à la ventilation de nuit (rafraîchissement géothermique par le sol, rafraîchissement radiatif par l'eau du lac sans machine de froid, ventilateurs plafonniers, ventilation naturelle traversante). Il est nécessaire aussi de rendre le contrôle de la stratégie de ventilation et des apports thermiques plus efficace (automatisation des stores, automatisation des ouvrants, mesures d'économie d'énergie électrique).

Influence de vagues de chaleur.

- Les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes et plus intenses avec le changement climatique
- Le confort peut toujours être assuré avec la stratégie de ventilation de nuit même pendant la pire vague de chaleur.
- Sans une stratégie de ventilation nocturne efficace et bien maîtrisée, le confort n'est pas assuré malgré la nette amélioration
- Les besoins de froid sont augmentés de manière significative pendant années avec vague de chaleur.
- Les stratégies de ventilation diminuent les besoins de froid de 48 à 86% même avec la pire vague de chaleur.

3.2.4 Effets de l'environnement proche du bâtiment

Bien qu'à l'échelle macro-urbaine le climat n'est pas altéré de manière à influencer significativement le comportement du bâtiment, le voisinage du bâtiment, les obstacles devant les fenêtres ou à proximité, l'absorption solaire et la température des objets proches de la fenêtre ou la température de la façade créant un couche limite autour du bâtiment peuvent influencer l'efficacité d'une stratégie de ventilation. Soit ces éléments peuvent réchauffer l'air avant d'entrer par la fenêtre (stores, protections des aérateurs bâtiments voisins ou façades de couleur sombre), soit ils obstruent le passage de l'air, soit ils font les deux (par exemple les stores toiles ou les façades double peaux).

Tsoka a montré qu'un canyon urbain peut augmenter la température localement, surtout près du sol où la chaleur est absorbée par le sol de couleur sombre et l'air stagne [39], mais aussi la diminuer s'il est étroit et empêche le soleil réchauffer les surfaces et préserve la fraîcheur nocturne ou s'il a des arbres qui font office de protection solaire et font évaporer l'humidité.

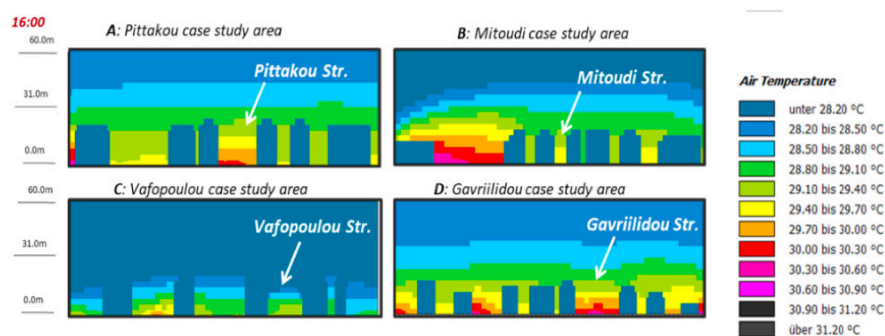


Figure 32 : Simulation de la température de l'air dans 4 canyons urbains à Thessaloniki avec le logiciel Evnimed [39]

Il serait illusoire d'imaginer qu'en plus de l'effort de simulation dynamique du climat intérieur les physiciens du bâtiment simuleraient aussi le microclimat extérieur. Nous voyons sur la figure ci-dessus que l'augmentation maximale de la température par l'effet du canyon est de l'ordre de 1.5°C au rez-de-chaussée et moins pour les étages supérieurs. C'est significatif, mais il ne concerne pas l'ensemble du bâtiment. Une solution pour tenir compte un effet péjorant serait d'utiliser une année chaude plutôt qu'une année moyenne pour fichier météorologique. Ceci péjorerait le résultat plus que le réchauffement des environs de $1-1.5^{\circ}\text{C}$. D'un autre côté, nous péjorons les conditions aux limites en excluant l'effet du vent qui compense une partie de phénomène. Péjorer toutes les hypothèses de modélisation peut aussi conduire à des conclusions erronées.

Plus que la température extérieure et le vent, l'environnement proche peut modifier le rayonnement solaire. Dans le logiciel DIAL+ il est facile de simuler les obstacles proches ou lointains et leur effet sur le climat intérieur, même à partir d'une image google maps.



Figure 33 : Simulation des ombrages des arbres devant un des bâtiments de l'EPFL. Le bureau simulé est au rez-de-chaussée au milieu du bâtiment et les arbres de l'ensemble 1 sont de 6 m de hauteur, ceux de l'ensemble 2 de 10 m de hauteur et ceux de l'ensemble 3 aussi de 6 m de hauteur. Les arbres sont moins de 5 m de distance de la fenêtre. Sur le diagramme stéréoscopique, on voit qu'entre midi et 16 heures la façade est ensoleillée.

Sur la figure ci-dessus nous pouvons voir sur la photo que les arbres sont bien placés à une distance ni trop proche ni trop lointaine du bâtiment de la faculté des Sciences de Base à l'EPFL (moins de 5 m) de la façade orientée ouest. On voit que ces arbres à feuilles caduques n'apportent pas d'ombrage entre midi et 16 heures. Si le bâtiment n'a pas de stores au rez-de-chaussée et compte que sur l'ombrage des arbres, les besoins de froid augmentent de 9.9 kWh/m^2 à 13 kWh/m^2 , c'est-à-dire que nous avons une augmentation de 41%. Les arbres donc dans le cas de bureaux n'apportent pas une solution suffisante pour toutes les heures, même s'ils sont placés à une distance optimale et à une orientation favorable (ouest). Nous avons simulé les besoins de froid avec la protection par les arbres comme protection solaire complémentaire en présence des stores. Ces besoins sont de 9.7 kWh/m^2 au lieu de 9.9 , ce qui donne un CRR de 0.02. C'est donc négligeable. L'effet de ces arbres est donc de l'ordre du sensible. Après 16 heures les utilisateurs du rez-de-chaussée peuvent travailler avec les stores levés ou même s'ils sont baissés, le rayonnement solaire ne chauffe pas les stores, et donc l'air de la ventilation naturelle qui les traverse. En règle générale, la température des feuilles des arbres suit la température de l'air, ce qui rend le bureau du rez-de-chaussée en situation un peu avantageuse par rapport à un autre bureau qui serait devant un parking goudronné, ou un autre avec une façade sombre au soleil. Il est donc pratiquement impossible de se passer des protections solaires grâce aux arbres, et si nous avons de bonnes protections, les arbres offrent des avantages secondaires (avoir une façade à l'ombre qui ne chauffe pas seulement quelques heures de la journée).

Le réchauffement des stores ou de la façade par le rayonnement solaire est un problème réel, surtout pour les bâtiments ventilés naturellement par les fenêtres. Sur l'image ci-dessus, on voit que les stores derrière une fenêtre ouverte sont bien plus chauds que la température de l'air. Ici la température de l'air était de l'ordre de 28°C, tout comme la température intérieure, alors que la température du store un peu plus de 35°C. Il est difficile de déterminer la température de l'air entrant parce que c'est un environnement très dynamique, mais diverses mesures ont montré une augmentation de température de l'ordre 1 à 3°C, sans compter l'effet radiatif de la surface chaude des stores apparents. Il est pratiquement impossible de refroidir derrière de stores sous le soleil, surtout s'ils ne sont pas de couleur blanche ou très claire. Même les stores de couleur gris clair (le cas de la photo) ont un coefficient d'absorption de 0.4.

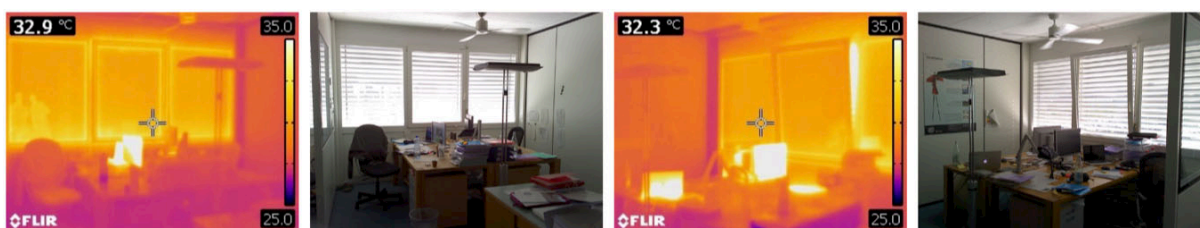


Figure 34 : Visualisation qualitative du réchauffement de l'air par un store à lamelles. Lorsque nous ouvrons la fenêtre pour ventiler, l'air est chauffé par le rayonnement solaire absorbé par le store. Il est d'autant plus important que la couleur du store est sombre.

Il n'y a pas que les stores qui réchauffent l'air avant d'entrer dans les locaux. Les doubles-peaux ou les façades sombres créent un canal d'air chaud ou une couche limite d'air chaud, une sorte de rideau d'air chaud qui va vers le haut et qui enveloppe le bâtiment empêchant l'air frais de pénétrer dans le bâtiment par les fenêtres.

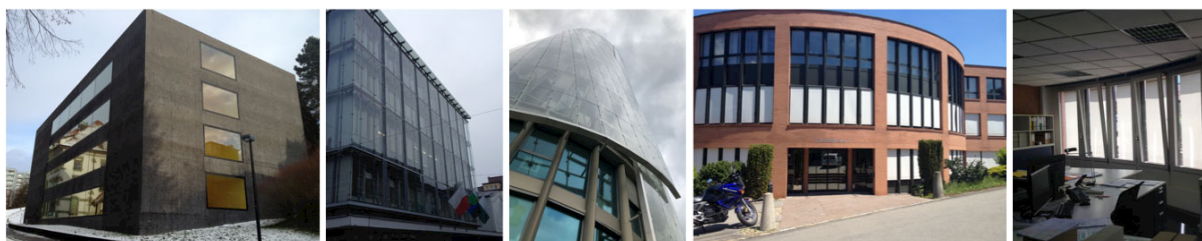


Figure 35 : Diverses situations qui peuvent créer une couche limite d'air chaud près de la fenêtre. Dans le dernier cas avec les stores en toile, la protection solaire en plus de l'effet de réchauffement, il empêche aussi l'air de circuler. Ce bâtiment avait de sérieux problèmes de surchauffe estivale et le remplacement de stores en toile par des stores à lamelle a résolu le problème, même si ces stores sont de couleur moins clair que les existants.

Tous les bâtiments des images ci-dessus posent de problèmes de surchauffe estivale même s'ils respectent les conditions de la norme SIA 180 pour la protection estivale (g du store, ouverture des fenêtres, masse thermique). Si ces bâtiments ne sont pas climatisés, en d'autres termes s'ils doivent compter sur la ventilation naturelle, les dispositifs de protection solaire l'empêchent en présence du rayonnement solaire.

Sur une façade sud cette limitation du potentiel de rafraîchissement dure toute la journée, sur une façade est, les stores limite la ventilation matinale que jusqu'à 11 heures, soit pendant la durée qui est le plus bénéfique au refroidissement du bâtiment ou des personnes, et sur une façade ouest ils empêchent la ventilation de l'après-midi, ce qui est moins problématique, car il s'agit des heures les plus chaudes de la journée pendant laquelle les fenêtres sont censées être fermées dans un local confortable.

Il est difficile de simuler ces conditions aux limites. Les phénomènes sont complexes et les logiciels n'apportent pas des automatismes pour modifier de manière dynamique la valeur g d'un store en fonction de la ventilation ou de modifier la stratégie de ventilation en fonction de la température du store. Pourtant, la modélisation de ces phénomènes est nécessaire, car ils constituent la raison principale de la surchauffe de ces bâtiments. Afin de quantifier l'ordre de grandeur de l'effet du réchauffement du store, nous avons rajouté 300W de chaleur pendant les heures d'ensoleillement sur la façade ouest lorsque la fenêtre est ouverte un jour estival moyen où la température extérieure varie entre 17°C et 26°C. Nous avons simulé les températures dans une double peau large de 60 cm ouverte en haut et en bas sur toute sa largeur avec un store de coefficient d'absorption de 0.4 (gris clair) lorsque le rayonnement incident est de 300 W/m². Cette situation assez aérée n'est pas très loin d'un store classique sans écran devant. Nous avons choisi la température intérieure et extérieure égales pour quantifier le réchauffement pur. On voit sur l'image que le réchauffement du store est de l'ordre de 9°C à 35.1°C avec ces conditions de simulation. La température en haut du canal monte de 2.4°C.

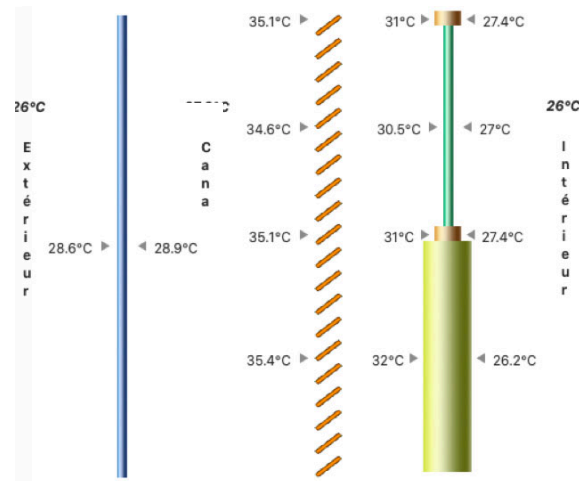


Figure 36 : Simulation des températures dans une double peau sur un étage avec une ouverture en bas et en haut d'une largeur de 60 cm et un store d'un coefficient d'absorption de 0.4 (gris clair).

Pour quantifier l'effet d'un store gris à l'ouest exposé au soleil, nous avons utilisé le logiciel Lesocool du laboratoire d'énergie solaire qui calcule un local sur une journée en approximant et assimilant sa masse thermique à un mur semi-infini d'une effusivité thermique donnée. Nous avons calé l'effusivité thermique du local de référence pour que la hausse de température avec les gains solaires et internes identiques utilisés par DIAL+ dans une simulation standard et le même débit de ventilation soit la même. Puis nous avons rajouté 300W de chaleur pendant les heures où la façade ouest est ensoleillée et la fenêtre est ouverte. Ceci correspond à un débit de ventilation d'environ 300 m³/h et avec une hausse de la température de l'air qui entre par la fenêtre d'environ 3°C.

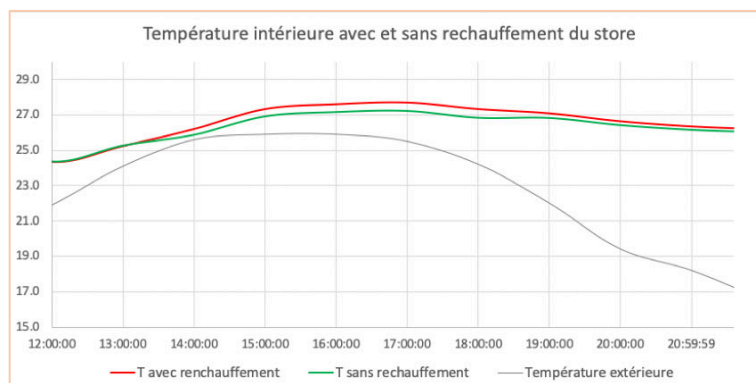


Figure 37 Élévation de la température intérieure du local de référence (+0.5°C) simulé avec Lesocool avec une élévation de la température devant la fenêtre de 3°C, environ 300W pour un débit d'air d'environ 300 m³/h.

La température de l'air dans le local après 14 heures monte d'environ 0.5°C un jour d'été normal avec une température extérieure d'environ 26°C. L'effet désagréable du réchauffement du store par le soleil pendant la ventilation n'est pas seulement cette hausse de la température moyenne du local de 0.5°C. Il y a aussi l'effet de l'air entrant qui est plus chaud et accentue le sentiment d'inconfort. De plus, un réchauffement du store et de l'air avoisinant la fenêtre diminue la différence entre la température intérieure et extérieure, voire il l'annule ou l'inverse affectant le débit d'air effectif par la fenêtre. La complexité de ces phénomènes dépasse la capacité des professionnels de les intégrer dans les simulations standard d'optimisation. Une façon de prendre en compte ce phénomène de manière simple serait de modifier la valeur g du vitrage en fonction de la couleur du store pendant les heures de ventilation lorsque le store est sous le soleil.

Malheureusement il n'est pas possible de quantifier tous les indicateurs de confort et les indicateurs énergétiques avec l'effet du réchauffement d'un store. Ceci nécessite des développements importants sur les logiciels simples ou un effort de modélisation considérable pour de logiciels plus complexes. Mais si sur une journée estivale pas trop chaude nous avons ½ °C de température de différence sur la moitié d'une journée, les indicateurs de confort et énergétique doivent être affectés de manière significative.

Influence de l'environnement proche de la fenêtre.

- Les canyons urbains peuvent augmenter la température de l'air à la proximité du bâtiment.
- Les modifications concernent plus le rez-de-chaussée plus que les étages supérieurs.
- Les canyons modifient la température, mais aussi le rayonnement solaire
- Une rangée d'arbres devant un bâtiment influence peu le comportement moyen du bâtiment.
- Les modifications micro-urbaines ont une influence faible à moyenne pour l'ensemble du bâtiment.
- Le réchauffement des stores et des façades peut modifier de manière significative le comportement thermique d'un local ventilé naturellement (+0.5°C en moyenne pendant les heures d'ensoleillement).
- Le réchauffement de l'air devant et l'obstruction de la fenêtre sont un facteur important qui peut créer une surchauffe.

3.2.5 Effet du changement climatique

Le changement climatique commence à être bien documenté, au point que nous pouvons simuler le comportement du bâtiment très aisément. Le dernier rapport de l'office fédéral de la météorologie et de la climatologie MétéoSuisse de 2018 fait état de la situation et décrit les changements et les scénarios par région de la Suisse selon 3 scénarios pour 2035, 2060 et 2085 [40]. En ce qui concerne le climat estival, se sont le nombre de jours estivaux, ainsi que le nombre de jours et nuits tropicaux qui changent. Les vagues de chaleur changent en fréquence et en intensité. La grande vague de 2003 avec 50 jours tropicaux à Genève n'a pas encore été répétée, mais les années 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 se suivent avec 30 jours tropicaux ± 5 . La question est, comment sera le temps dans le futur. Comment il sera par exemple en 2060, lorsque les bâtiments construits ou rénovés aujourd'hui ne seront pas encore rénovés. Selon le rapport de MétéoSuisse sur les villes principales Suisses, surtout sur l'arc lémanique et au Tessin, nous passerons de 15 jours tropicaux de la période 1991-2010 à 40 en 2035, à 60 en 2060 et à environ 100 en 2080.

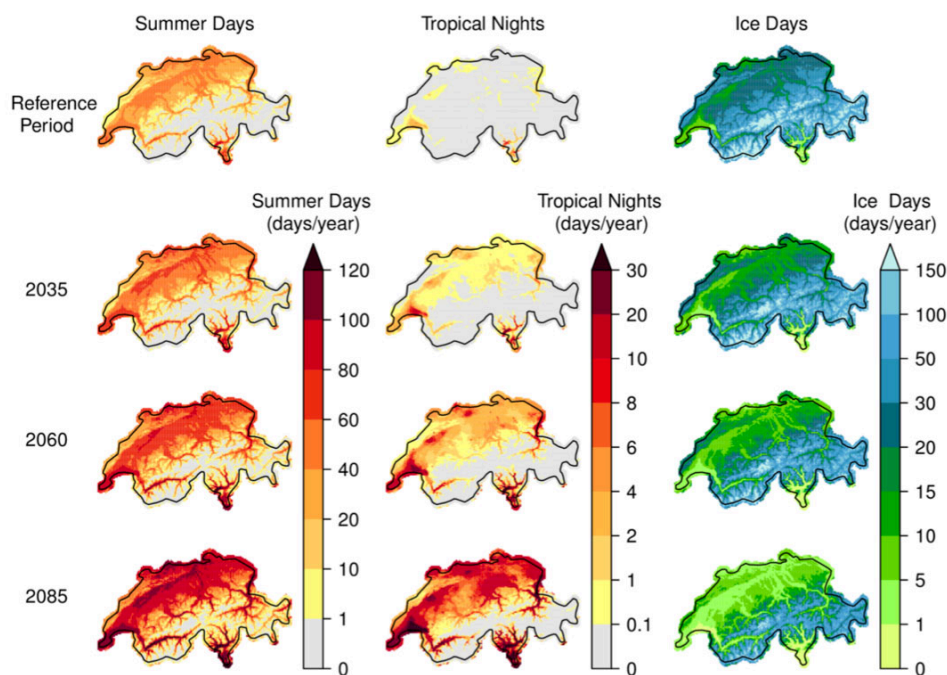


Figure 38 : Évolution des jours et des nuits tropicaux par région dans le futur

Le logiciel Meteonorm offre la possibilité de simuler le climat des sites dont il dispose des données, en fonction des hypothèses de l'IPCC sur le changement climatique comme elles sont expliquées dans le rapport sur le climat de 2007 [41]. Nous avons simulé une météo selon les scénarios B1 et A2 pour 2060. Comme la question des vagues de chaleur est importante en été, nous avons aussi simulé le scénario A2 avec les températures estivales maximales.



MOYENNES DES MULTI-MODÈLES ET FOURCHETTES ESTIMÉES DU RÉCHAUFFEMENT EN SURFACE

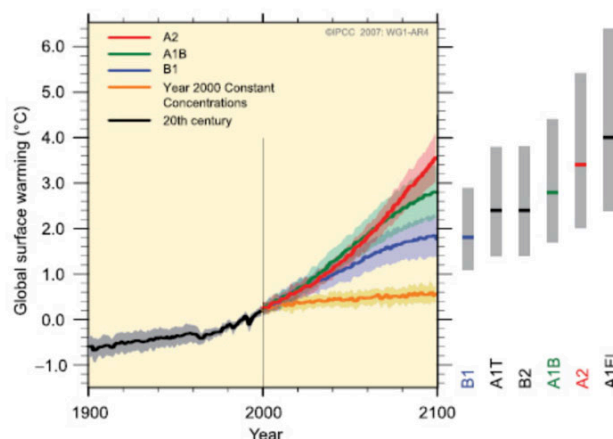


Figure 39 : Hypothèses d'évolution de la température de l'IPCC. Le scénario B1 prévoit une augmentation moyenne de la température de la surface du globe de 1.8°C, le scénario A1B 2.8°C, et le scénario A2, qui est pessimiste, 3.4°C.

Le scénario A2, pessimiste, suppose une augmentation moyenne des températures de 3.4°C. Comme nous avons vu dans le paragraphe avec les vagues de chaleur (3.2.3) ce qui est le plus problématique n'est pas vraiment l'augmentation de la température moyenne sur l'année, mais l'augmentation des vagues de chaleur. Meteonorm nous offre la possibilité de créer une météo annuelle selon le scénario A2 avec les températures maximales estivales. C'est le scénario que nous avons appelé IPCC A2 – Max.

	Genève Cointrin	IPCC B1 Genève Cointrin	IPCC A2 - Genève Cointrin	IPCC A2 - Max Genève Cointrin
Heures avec $T_e > \text{ISO 7740 (26.5°C)}$	193	307	375	813
Heures de surchauffe* V_0	902	1095	1182	1276
Heures de surchauffe* V_j	40	109	171	418
Heures de surchauffe* V_n	0	0	0	29
Heures de surchauffe* $V_m q_{\text{SIA2024}} \times 1$	177	405	472	696
Besoins de froid standard DIAL+ kWh/m ² a	9.9	13.4	15.6	21.7
CRR V_j	0.73	0.55	0.52	0.36
CRR V_n	0.92	0.83	0.81	0.68
CRR $V_m q_{\text{SIA2024}} \times 2$	0.78	0.62	0.58	0.44

Tableau 16 : Indicateurs de performance avec deux scénarios de changement climatique

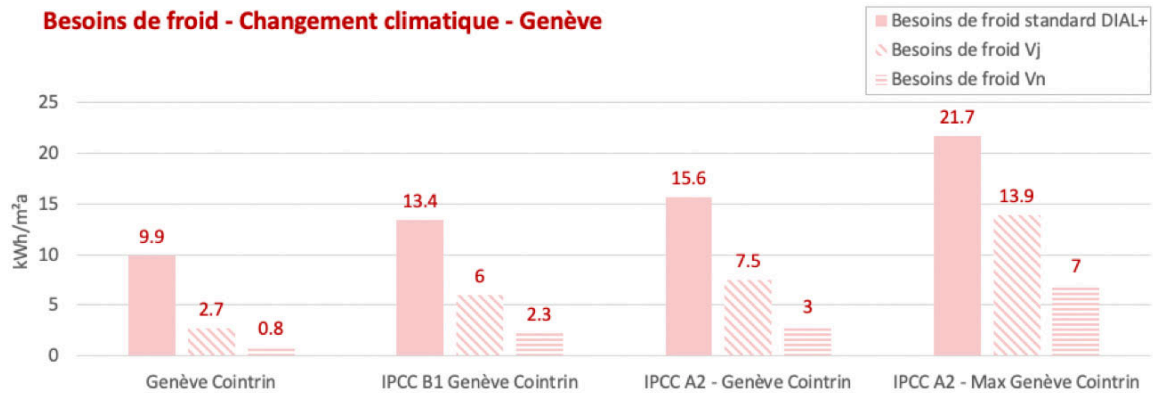


Figure 40 : Besoins de froid pour 3 stratégies de ventilation et 2 scénarios.

La première observation sur le tableau et la figure est que le changement climatique va provoquer une augmentation des besoins de refroidissement. Mais cette augmentation est du même ordre qu'un store pas assez efficace ou mal géré, ou d'un réglage de la température de consigne trop basse. Nous passons de 9.9 kWh/m²a à 13.4 avec le scénario B1 d'augmentation de 1.8°C et à 15.6 avec le scénario pessimiste A2 d'augmentation de la température de 3.4°C. On observe aussi que cette augmentation de la température est parfaitement gérable avec une stratégie de ventilation nocturne efficace. En revanche, la stratégie de ventilation uniquement pendant les heures d'utilisation devient limite, avec 109 et 191 heures en dehors de la zone de confort. En comparant ces résultats avec les résultats du paragraphe (3.2.3) sur les vagues de chaleur, nous pouvons en déduire que les bâtiments ont déjà « dégusté » le changement climatique en juin et août 2003 et en juillet 1994. Le pire scénario de changement climatique (A2) aura comme effet moyen sur les bâtiments en été un effet moins important que l'été 2003. Ce qui changera donc sera la fréquence de ce phénomène.

Avec le scénario A2-max nous avons souhaité nous projeter dans une vague de chaleur en 2060 avec le pire scénario d'augmentation de 3.4°C. Dans ce cas, qui a quelques probabilités d'arriver une fois dans les prochaines décennies, les besoins de froid sont 2.2 fois plus importants que le scénario moyen d'aujourd'hui, le rafraîchissement uniquement avec la ventilation du jour est clairement insuffisant, et le refroidissement par ventilation nocturne devient juste limite (29 heures de surchauffe). L'effet est important, mais nous pouvons le relativiser avec l'effet d'un store pas efficace ou mal utilisé, avec un bâtiment trop vitré, qui est du même ordre.

Ce que nous pouvons retenir, c'est que malgré l'augmentation du nombre de jours estivaux, l'augmentation du nombre de jours ou de nuits tropicaux, le refroidissement par ventilation reste une technique efficace. Les règles de conception ne changent pas, et la stratégie de ventilation nocturne sera capable d'offrir un confort acceptable en été pour le local type étudié.

Prendre trop de précautions, et commencer à climatiser les bâtiments « pour être prêts » n'est pas une attitude nécessaire, elle contribue simplement à justifier une mauvaise conception architecturale, à polluer encore plus et à accélérer le changement climatique.

Les vagues de chaleur sont plus difficilement gérables, les vagues trop importantes resteront des événements isolés et limités dans le temps pour la Suisse, mais concevoir de bâtiments qui sont confortables pour un été moyen rend aussi la maîtrise d'une vague de chaleur exceptionnellement vigoureuse plus facile.



Influence du changement climatique.

- En 2060 quel qu'il soit le scénario de progression du phénomène, il y aura une augmentation significative du nombre de jours et de nuits tropicaux (d'environ 20 ± 5 jours tropicaux aujourd'hui à 40 ± 10).
- Dans le pire des scénarios, une année moyenne en 2060 sera un peu moins intense que l'année déjà vécue en Suisse en 2003.
- L'impact du changement climatique sur les bâtiments en été reste maîtrisable avec les mêmes techniques que nous utilisons aujourd'hui pour gérer le phénomène de vagues de chaleur.
- La stratégie de refroidissement par ventilation reste, pour le climat suisse, toujours la stratégie passive la plus efficace et elle est suffisante pour maîtriser l'impact du changement climatique.

3.3 Impact de paramètres de conception

Comme nous avons vu dans le guide de conception de l'annexe 62 [7], le paramètre principal d'influence sur le confort estival et sur l'efficacité de la stratégie de ventilation est les gains solaires. Les gains solaires peuvent être importants soit par l'utilisation d'une mauvaise protection solaire (ce qui ne serait pas conforme avec la réglementation SIA 180 sur la protection estivale, soit par une part trop vitrée, soit par une mauvaise utilisation des stores par les occupants.) Nous allons simuler ces paramètres pour évaluer les indicateurs de confort et les indicateurs énergétiques. Une fois le bureau standard avec 60% de partie vitrée sur une façade, une fois sans contrecœur, 84% vitré et une fois vitré sur deux façades. Nous allons aussi considérer une mauvaise utilisation du store avec seulement 50% réellement utilisé.

Les gains internes peuvent aussi varier et c'est le deuxième facteur d'influence. Dans le cahier technique SIA 2024, nous avons 3 niveaux de gains internes et de niveau d'occupation que nous allons simuler.

Comme nous avons vu avec le local standard d'une salle de classe, avec une forte occupation, le degré d'ouverture des fenêtres peut être critique. Nous allons donc faire varier aussi le degré d'ouverture des fenêtres.

Le dernier paramètre d'influence est la masse thermique. Nous avons évalué l'influence de ce facteur plus profondément en collaboration avec le Smart Living Lab de l'EPFL où nous avons construit un dispositif expérimental avec deux locaux standard avec masse thermique différente. Nous avons testé expérimentalement les locaux avec masse thermique légère et moyenne utilisant comme élément massif de murs ou de sols en terre.

Finalement une combinaison de facteurs peut créer de situations extrêmes. Un local léger trop vitré avec faible degré d'ouverture par exemple peut générer de situations de surchauffe importante. Ou encore, la masse thermique sur un bâtiment trop vitré joue un rôle différent que sur un bâtiment modérément vitré, ce qui peut avoir un rôle important pour la conception de bâtiments en bois.

3.3.1 Impact des gains solaires (part vitrée et efficacité de la gestion des stores)

Nous avons simulé le bureau standard SIA 2024 une fois avec une façade vitrée et un contrecœur, soit une partie vitrée de 50%, une fois sans contrecœur, soit une façade vitrée de 84%, et une fois avec deux façades vitrées de 84% et 100%. Enfin, nous avons testé le premier local vitré à 50% avec une mauvaise stratégie de gestion des stores (les stores sont à moitié fermés).



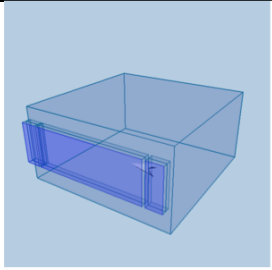
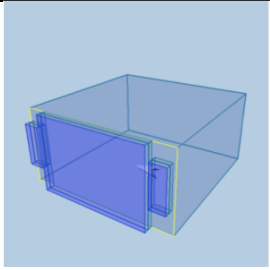
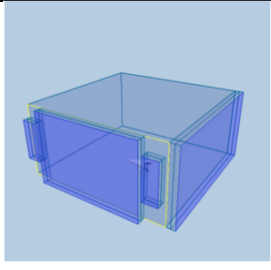
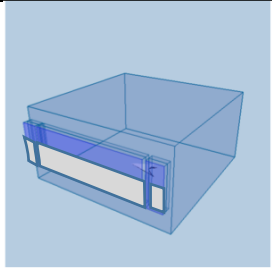
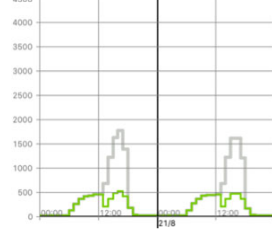
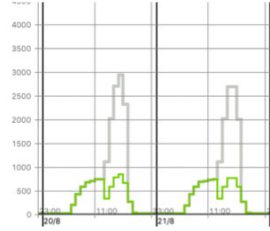
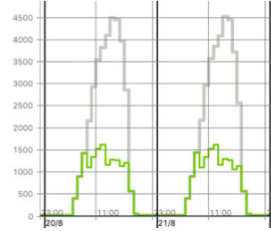
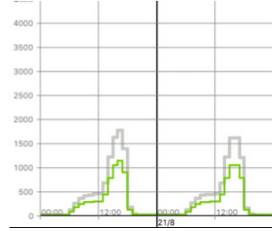
			
			
Stores standard	1 façade vitrée	2 façades vitrées	Stores 50%
Vitré 50%	Vitré 84%	84/100% vitrées	Vitré 50%

Tableau 17 : Parties vitrées et gains solaires des scénarios simulés le 20 et 21 août

L'analyse des gains solaires du tableau ci-dessus nous donne déjà une série d'informations avant de voir le comportement thermique du local. Le local avec un contrecœur arrive à 500W (14 W/m²) l'après-midi avec les stores baissés. Nous avons le même ordre de grandeur le matin avec les gains du rayonnement diffus (nous sommes en orientation ouest). A partir de 13 h les stores sont baissés, car selon la régulation l'automatisation la protection solaire est activée dès que le rayonnement solaire incident dépasse 200 W/m². Pour rappel, nous avons utilisé les propriétés de protections solaires à lames, avec un g=0.14 (protection + vitrage) comme le stipule le cahier technique 2024, et un vitrage triple de g=0.5. Avec une part vitrée plus importante, les gains solaires qui passent à travers le store et le vitrage montent à 750W (21 W/m²), et avec deux façades vitrées les gains montent à plus de 1500W (42 W/m²). Avec une utilisation manuelle partielle du store, pratique très courante dans les bureaux **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**[42], nous avons l'après-midi plus de 1000W (28 W/m²) au lieu de 500 avec les stores fermés.

	Référence vitré 50%	Vitré sur 1 façade 84%	Vitré sur 2 façades 84/100%	Référence 50% du store fermé
Heures de surchauffe* V ₀	902	1010	1293	960
Heures de surchauffe* V _j	40	107	591	70
Heures de surchauffe* V _n	0	4	367	0
Heures de surchauffe* V _m q _{sIA} ×1	177	460	1043	298
Besoins de froid standard DIAL+	9.9	13.7	22.5	11.9
CRR V _j	0.73	0.66	0.52	0.69
CRR V _n	0.92	0.85	0.68	0.89



CRR $V_m q_{SIA2024} \times 2$	0.78	0.66	0.42	0.73
--------------------------------	------	------	------	------

Tableau 18 indicateurs de confort et indicateurs énergétique de 4 scénarios de gains solaires

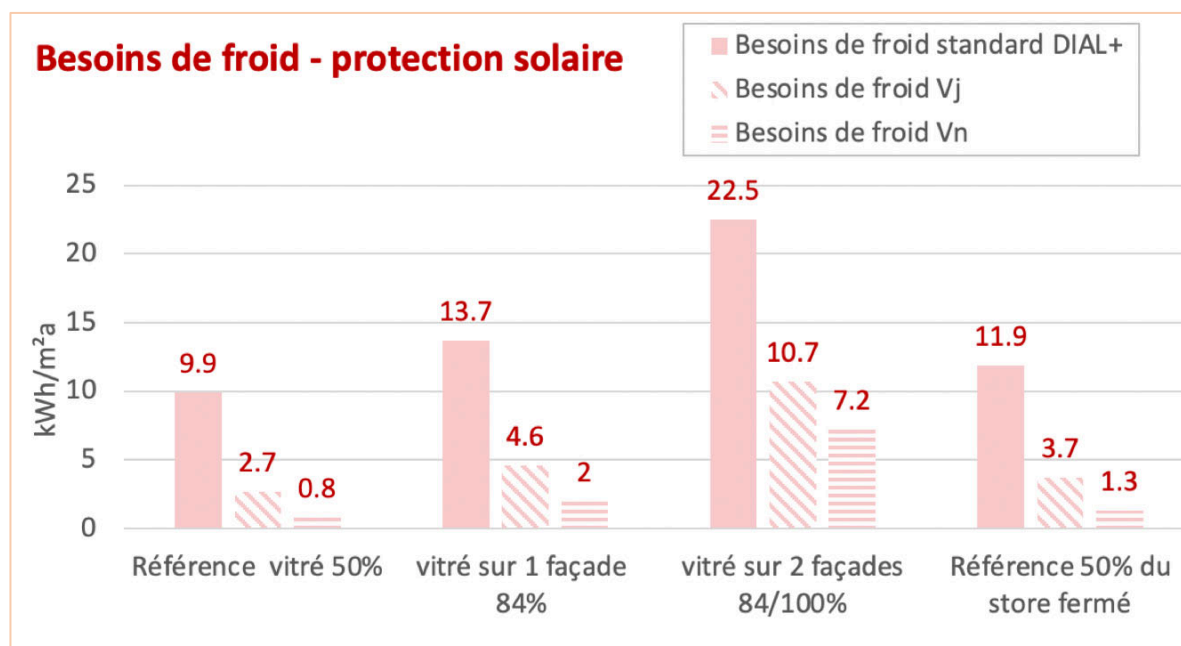


Figure 41 : Besoins de froid de 4 scénarios de gains solaires

Comme on voit dans le tableau et la figure ci-dessus, les gains solaires sont un facteur prépondérant, tant pour le confort thermique, que pour la consommation d'énergie pour la climatisation, ou l'efficacité de la stratégie de refroidissement par ventilation. Les besoins de chaleur grimpent de 9.9 kWh/m² à 13.7 kWh/m² (138%) avec une façade vitrée à 84% et à 22.5 kWh/m² (225%) avec un bureau d'angle avec deux façades vitrées. Une utilisation partielle du store augmente les besoins de froid à 11.9 kWh/m² (120%). En termes d'efficacité de la stratégie de ventilation pour refroidir les locaux, l'impact est très important pour la façade vitrée sur une orientation et catastrophique pour la façade à deux orientations vitrées. Avec la ventilation du jour uniquement, le confort n'est nettement pas garanti avec 107 et 591 heures de surchauffe respectivement. La ventilation nocturne garantit à peine le confort avec une façade vitrée, mais présente 367 heures de surchauffe avec la façade vitrée sur deux orientations. Un immeuble de bureaux complètement vitré, y compris dans les angles, serait donc obligatoirement climatisé pour respecter les conditions de confort.

Un local d'angle vitré sur deux façades, en plus de la charge thermique par les façades, il a en plus une charge radiative. Les deux façades vitrées, même avec un bon store, ont une température de surface de 27 à 28°C au lieu de 26°C d'un mur. Pour compenser la sensation radiation chaude les utilisateurs mettent souvent la climatisation à 24°C (voir 22°C) au lieu de 26°C selon la norme. Cette température de consigne plus basse génère une consommation d'énergie supplémentaire.

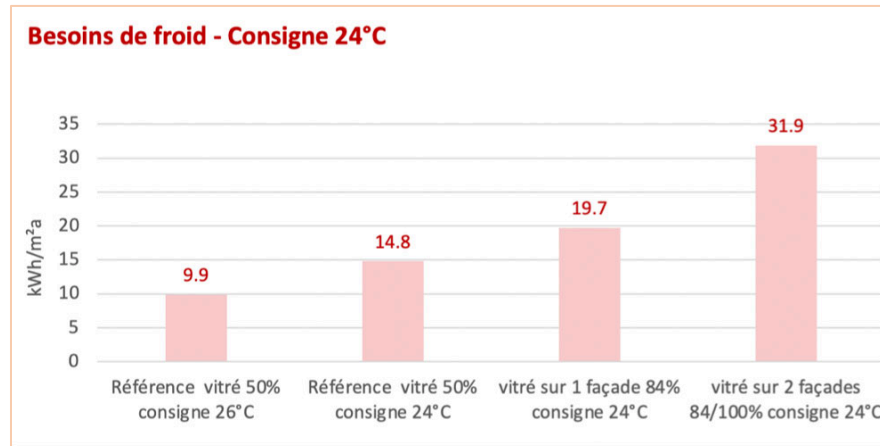


Figure 42 : Besoins de froid avec une consigne de 24°C

Comme on voit sur le graphique ci-dessus, un abaissement de la consigne à 24°C a des effets désastreux sur la consommation énergétique du bâtiment. Les besoins de froid d'un bureau vitré est le double de la situation normale (19.7 kWh/m²) et pour le bureau d'angle, plus que le triple (31.9 kWh/m²). Les besoins de froid dépassent les besoins de chaleur, et s'il n'y a pas une source de froid gratuite (par exemple eau du lac), nous ne pouvons pas parler de bâtiment de haut ou très haut standard énergétique. Nous ne pouvons non plus compter sur la ventilation nocturne pour baisser de manière drastique la consommation d'énergie. Comme nous pouvons voir sur le Tableau 18, le CRR du bureau trop vitré avec ventilation nocturne est de 0.68 au lieu de 0.92. Avec une consigne de 24°C le CRR est encore plus bas (0.45), mais la mise en pratique d'un système hybride avec climatisation et ventilation naturelle d'un local avec de tels besoins devient difficile à réaliser et à réguler.

3.3.1.1 Gains solaires est et gains solaires ouest

Nous avons simulé le comportement du même local orienté est et ouest. En présence de protections solaires bien régulées, les deux orientations se comportent de la même façon. Au moment où une orientation est chargée de gains solaires directs qui passent à travers le store, l'autre orientation subit les gains solaires du rayonnement diffus sans modération par le store. L'ordre de grandeur des gains diffus sans store et de gains solaires directs modérés par le store est le même.

Là où il y a une différence entre les deux orientations, c'est lorsque la protection solaire est déficiente ou insuffisante. Cela peut arriver dans plusieurs contextes :

- les constructions sont anciennes avec protection solaire intérieure,
- la régulation de la protection solaire est manuelle et les utilisateurs les baissent partiellement,
- les stores sont de couleur très sombre et ils préchauffent beaucoup l'air en présence de rayonnement direct.

Nous avons simulé tous ces cas avec une simulation générique qui prend 50% du rayonnement direct et diffus passer à travers le store. Les différences en termes d'indicateurs annuels sont petites. Mais il y a de jours où le fait d'avoir le réchauffement par le soleil au moment où l'air est frais rend la ventilation plus efficace pour évacuer la chaleur plutôt que de l'avoir l'après-midi où l'air extérieur est chaud et n'a pas de potentiel de refroidissement. Ceci rend un bureau orienté est plus intéressant

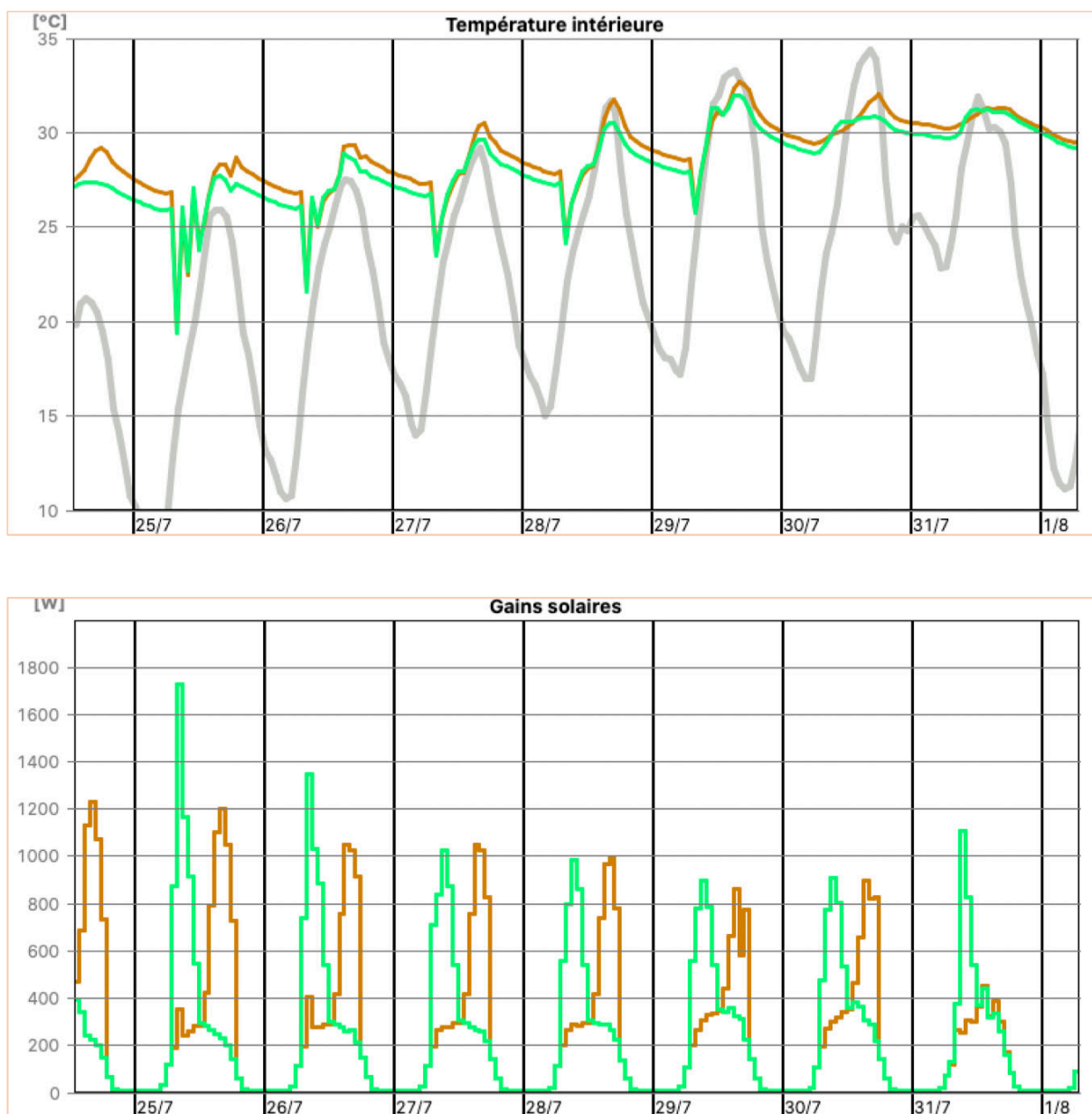


Figure 43 : Gains solaires et température intérieure pour le local de référence orienté est (vert) et ouest (rouge) pendant une semaine chaude du mois d'août.

En termes d'indicateurs annuels, nous avons 11.4 kWh/m² de besoins de chaleur pour l'orientation est au lieu de 11.9 kWh/m² pour l'orientation ouest avec cette stratégie de protection solaire 50% du store baissé. Le CRR pour la ventilation du jour est de 0.71 pour l'orientation est au lieu de 0.69 pour l'orientation ouest et le CRR pour la ventilation de nuit de 0.91 pour l'orientation est ou lieu de 0.89 pour l'orientation ouest. Nous avons aussi simulé l'orientation sud, avec une protection solaire rigoureuse ou automatique elle présente un comportement similaire. Avec une protection déficiente, il est légèrement plus pénalisé, car il est plus longtemps soumis au rayonnement solaire.



Influence de la part vitrée et des protections solaires.

- Les simulations confirment l'influence majeure de la part vitrée du local et de la gestion des gains solaires, tant pour le confort thermique estival que pour l'efficacité de la stratégie de ventilation.
- Un local très vitré sur une orientation est plus chaud et consomme plus d'énergie pour le froid. La stratégie de ventilation diurne n'est pas suffisante pour le confort, mais la stratégie de ventilation nocturne arrive tout juste à apporter le confort.
- Un local d'angle avec deux façades vitrées (sud et ouest) consomme beaucoup plus d'énergie, doit être dimensionné individuellement pour la puissance et la distribution de froid. Aucune stratégie de ventilation, diurne ou nocturne n'est suffisante pour assurer le confort estival.
- L'automatisation des stores, obligatoire en cas de climatisation, est aussi souhaitable pour les locaux refroidis naturellement, surtout s'ils sont bien vitrés. Les heures de surchauffe sont bien supérieures avec une régulation des stores peu rigoureuse.
- L'orientation du local sud, est ou ouest n'influence pas les performances énergétiques du local si les stores sont rigoureusement gérés. Dans les faits, avec une régulation peu rigoureuse ou avec le réchauffement de l'air par le store l'orientation est légèrement préférable, car la chaleur excédentaire est évacuée par l'air matinal plus frais.
- Une façade trop vitrée a une influence négative sur le confort thermique et sur la consommation d'énergie pour le froid du même ordre que celle du changement climatique, de l'effet de l'îlot de chaleur ou des vagues de chaleur.

3.3.2 Impact des gains internes

Selon le Tableau 8, la SIA 382/1 stipule qu'à partir de $140 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$, avec l'aération du jour et nuit, un refroidissement est souhaitable, et à partir de $200 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$ il est nécessaire.

Toutes les simulations réalisées jusqu'à maintenant sont avec les gains internes de SIA 2024 et totalisent de gains internes de $153 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$. Nous avons vu qu'avec ces gains, nous arrivons à refroidir même un local 84% vitré et nous pouvons garantir le confort du local de référence même avec le réchauffement climatique en 2060. Dans ce paragraphe nous avons doublé l'occupation et le dégagement de chaleur des appareils selon SIA 2024, ce qui nous amène à mettre 5 personnes (10 W/m^2) dans 36 m^2 , 540 W de chaleur par les appareils (15 W/m^2) et 572 W de gains pour l'éclairage (15.9 W/m^2). Tout ceci nous totalise $256 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$, bien supérieur que la limite de $200 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$ qui pose la SIA 382/1 pour climatiser les locaux qui peuvent avoir une ventilation nocturne. Les résultats dans le Tableau 19 qui suit montre que même avec $256 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$ de gains internes nous arrivons à refroidir le local de référence avec une ventilation nocturne et diurne et garantir le confort.

Si nous analysons le graphique de la Figure 44 nous pouvons remarquer que doubler l'occupation / dégagement de chaleur augmente les besoins de froid de 52% passant à 15.2 kWh/m^2 . Avec plus de gains internes, une stratégie de ventilation du jour évacue plus de chaleur en valeur absolue (9.5 kWh/m^2 au lieu de 7.2 kWh/m^2 avec les gains des conditions standard) mais en valeur relative, son pouvoir de refroidissement CRR est de 0.63 au lieu de 0.73 et les heures résiduelles avec température qui sort de la zone de confort passent à 112 heures au lieu de 40 des conditions standard. Nous avons le même phénomène avec la stratégie de ventilation de nuit, où bien qu'elle évacue 12.6 kWh/m^2 le CRR baisse à 0.83 avec 4 heures hors de la zone de confort. Dans le Tableau 19 nous avons produit le diagramme de confort de la SIA 180 et nous pouvons voir que pour le local de référence les points se rapprochent à la limite de la zone du confort vers le haut, alors qu'avec les gains standard le nuage de points est bien plus bas que la ligne supérieure qui délimite le confort.



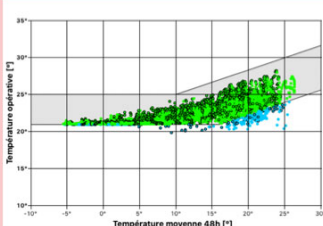
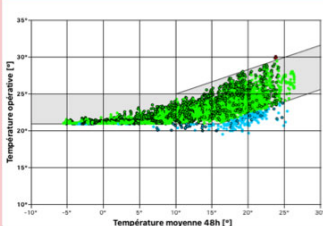
	Gains standard - 153 Wh/m ² .jour	Occupation double - 258 Wh/m ² .jour
Heures de surchauffe V_0	902	1242
Heures de surchauffe V_j	40	112
Heures de surchauffe V_n	0	3
Heures de surchauffe $V_m q_{SIA} \times 1$	177	735
Diagramme de confort V_n		
Besoins de froid standard DIAL+	9.9	15.1
CRR V_j	0.73	0.63
CRR V_n	0.92	0.83
CRR $V_m q_{SIA2024} \times 2$	0.78	0.58

Tableau 19 : Résultats des simulations pour le local de référence (153 Wh/m².jour de gains internes) et le même local avec une occupation double (258 Wh/m².jour de gains internes)

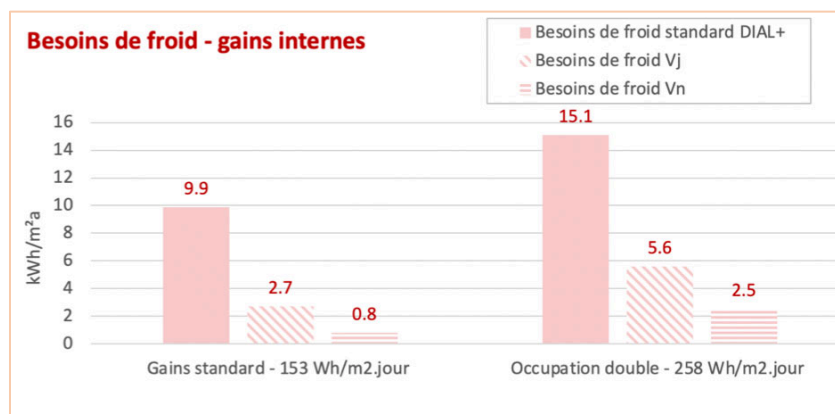


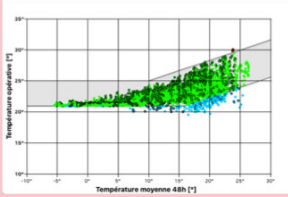
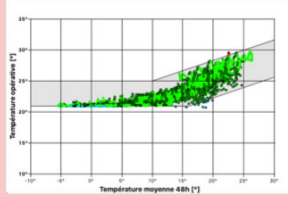
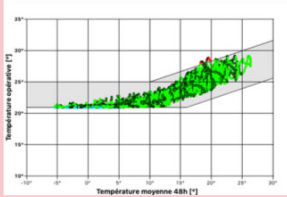
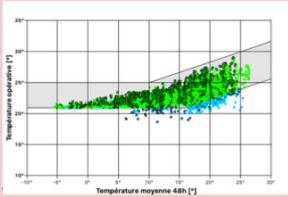
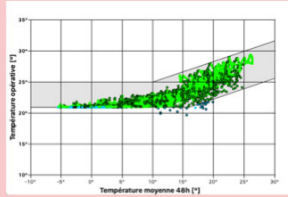
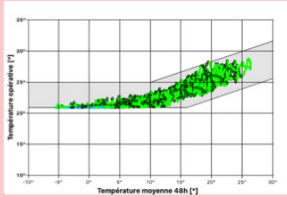
Figure 44 : Besoins de froid avec une occupation standard selon SIA 2024 (153 Wh/m².jour) et avec une occupation double (258 Wh/m².jour)

Nous avons reproduit le tableau de la SIA 382/1 pour le local standard vitré à 50% avec 1m² de surface ouvrable. Le tableau de la norme sous-estime fortement le pouvoir de refroidissement d'une stratégie de ventilation nocturne, alors qu'il considère que l'aération par les fenêtres pendant l'occupation pourrait assurer le confort jusqu'à 140 Wh/m².jour de gains internes et la ventilation mécanique jusqu'à 120 Wh/m².jour de gains internes. Selon nos simulations, pour avoir zéro heure d'inconfort qu'il soit avec une stratégie d'ouverture des fenêtres pendant l'utilisation, ou une ventilation mécanique 24h sur 24 sans ouverture de fenêtres, il faut baisser les gains internes à 90 Wh/m².jour. Pour s'éloigner de la limite



de l'inconfort sur le diagramme de la norme SIA 180, il faut baisser encore les gains internes à $\text{Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ 70. Ces valeurs peuvent bien sûr être plus élevées avec une part vitrée moins élevée, une ventilation traversante (non prise en compte dans les simulations), ou une utilisation du store plus efficace (le $g=0.38$ considère que les stores à lamelles sont baissés avec un angle de 45°C). Nous pouvons retenir qu'avec gains internes $> 70 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ il faut vérifier le confort avec une simulation dynamique.

En revanche, avec une ventilation nocturne, le local de référence peut absorber jusqu'à $200 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$, valeur bien plus élevée que $140 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ indiqué dans le tableau de la norme SIA 382/1.

	Apports thermiques internes $\text{Wh/m}^2\cdot\text{jour}$		
	Aération par les fenêtres jour ET nuit	Aération par les fenêtres locaux occupés	Sans aération par les fenêtres*
Nécessaire	>250 >200 	>90 >140 	>90 >120 
Souhaitable	200-250 140-200	70-90 100-140	70-90 80-120
Superflu	<200 <140 	<70 <100 	<70 <80 

* Avec ventilation mécanique jour ET nuit $2.6 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ (ventilation standard SIA 2024)

Tableau 20 : Tableau de la norme SIA 382/1 avec les valeurs limites déterminant le besoin de refroidissement.

La valeur de $153 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ correspond à l'occupation standard du local de référence (2.6 personnes pour 36 m^2 , gains internes de 7 W/m^2 (252 W) et 15.9 W/m^2 pour l'éclairage (572 W) avec une autonomie en éclairage naturel de 50%). La valeur de $90 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ correspond à une occupation standard avec des gains internes faibles (3 W/m^2) et une autonomie en éclairage naturel de 65%, alors que la valeur de $70 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{jour}$ correspond à une occupation de 1 personne pour 36 m^2 , des gains internes faibles (3 W/m^2), un éclairage de faible consommation (12 W/m^2 à 65% d'autonomie).



Influence des gains internes.

- Les gains internes jouent un rôle important pour le confort estival et l'efficacité de la stratégie de refroidissement par ventilation, autant que les gains solaires.
- Il faut prendre toutes les mesures pour réduire les gains internes avant de s'occuper de la stratégie de refroidissement : choix des appareils, densité d'occupation, éclairage bien dimensionné de très faible consommation et régulé « manual on – auto off », maximisation de l'autonomie en éclairage naturel.
- La norme SIA 382/1 sous-estime l'efficacité de la ventilation nocturne et surestime celle de la ventilation pendant l'occupation, naturelle ou mécanique. Il faut utiliser plutôt les critères de la norme SIA 180 pour déterminer la nécessité d'une climatisation et vérifier par simulation.

3.3.3 Impact du débit de ventilation

Selon le design guidelines de l'annexe 62 de l'AIE [6] après les gains solaires et internes, le facteur qui influence le plus les besoins de froid est la dimension des ouvertures. Le local de référence dispose d'une ouverture de 0.6X1.6 m, soit 1m², avec un ratio hauteur / largeur de 2.6, pour une surface de 25 m². Ceci fait 4% de la surface au sol. Le local de référence dispose de deux de ces fenêtres pour 36 m², soit 5.6% de la surface au sol, avec le même ratio hauteur / largeur.

Si l'on applique les critères simples de confort estival, la norme SIA 180 demande

- un débit de 10 m³/m²h
- ou des ouvertures mono-orientées >5% de la surface au sol si la profondeur du local est < à 2.5 fois la hauteur du local, sinon, il faut des ouvertures dans des murs opposés ou en coin.

Pour le local de référence ceci correspond à un débit de ventilation de 360 m³/h et >1.8 m² de surface d'ouverture. Les ouvertures que nous avons utilisées respectent assez bien la deuxième condition. Pour respecter la première, il faut une surventilation mécanique de 3.8 fois la ventilation hygiénique. Vu l'analyse effectuée lors de la définition de l'indicateur SEER_{VC}, un tel débit consommerait beaucoup d'électricité et correspondrait selon la Figure 19 à un SEER_{VC} de 1.5 avec un système de ventilation double flux de SPI = 0.4 W/(m³/h) (SPI 2). Selon le même indicateur, un tel sur-débit de ventilation mécanique ne commencerait à être énergétiquement rationnel qu'avec un système simple flux de SFP = 0.1 W/(m³/h) (SFP 1) où le SEER_{VC} serait de 4, et encore, à condition d'avoir une régulation optimale, soit limitée à 6 heures par nuit entre minuit et 6 :00 h du matin, soit avec une régulation optimisée fonctionnant avec un $\Delta T > 4^{\circ}\text{C}$ avec la température extérieure.

Si ces conditions de débit de ventilation ne sont pas respectées, la SIA 180 demande une vérification par simulation dynamique. Cette exigence pourrait conduire certains planificateurs à renoncer à la stratégie de refroidissement nocturne et à recourir à une climatisation.

Nous allons explorer la possibilité de réduire ces débits de ventilation, ainsi que la possibilité de les augmenter dans les cas où les gains solaires sont plus importants que les gains optimaux considérés pour le local de référence.

Nous avons donc défini 6 scénarios de ventilation (cf. Tableau 21).

- Le premier considère une ouverture de 30%, ce qui correspondrait aux mêmes ouvrants que le local de référence, mais ouvrables en imposte à 15 cm (cf. Figure 10).
- Le deuxième considère une ouverture de 60%, ce qui correspondrait aux mêmes ouvertures, mais couchées avec dimensions 1.6 largeur X 0.6 hauteur (au lieu de 0.6 largeur X 1.6 hauteur du local de référence), positionnées à la même hauteur (par exemple au-dessus du vitrage fixe).

- Le troisième est le local de référence, avec les deux ouvertures en vertical, 0.6 largeur X 1.6 hauteur, ouvrables complètement en battant ou comme on dit au langage courant « à la française ». Notons qu'ouvrir ces fenêtres avec un angle de 45° équivaut pratiquement à ouvrir complètement, ce qui nous fait un bras de 40 cm si nous souhaitons les automatiser. Ceci est possible parce les ouvertures sont étroites.
- Le quatrième scénario considère 180% du débit du scénario de référence, avec les deux ouvrants positionnés à 2.3 m de distance entre eux (un en haut du vitrage fixe et un en bas). Ce scénario a les mêmes ouvrants que le scénario 2, mais disposés différemment. Il a aussi la même surface ouvrable que le scénario de référence. Il offre 3 fois plus de débit que le scénario 2 et 1.8 fois plus que le scénario de référence.

Dans le diagramme qui suit, nous avons utilisé l'abaque de la Figure 9 pour calculer le débit de la fenêtre verticale 0.6 largeur X 1.6 hauteur (échelle de gauche) et de la fenêtre couchée 1.6 largeur X 0.6 hauteur. La relation entre le débit et la largeur de la fenêtre est linéaire, ce qui n'est pas le cas pour la hauteur où nous utilisons les courbes paraboliques.

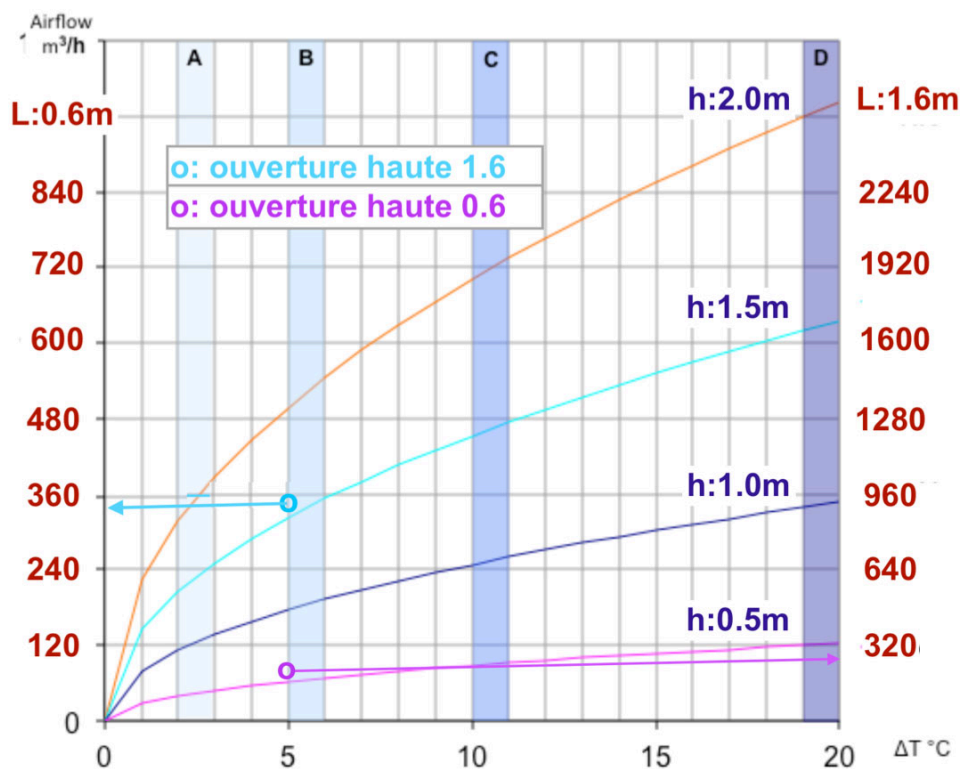
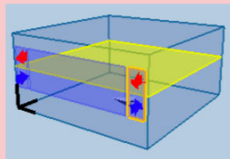
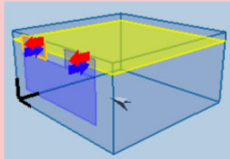
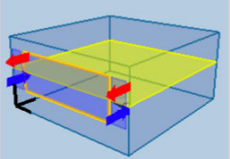
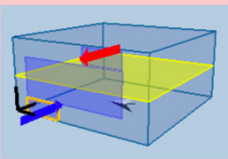


Figure 45 : Transformation de l'échelle de la Figure 9 pour calculer le débit de l'ouverture 1.6 hauteur X 0.6 largeur et de la même ouverture de 0.6 hauteur et 1.6 largeur : ratio de débit 0.6 pour l'ouverture couchée.

Pour calculer les débits du scénario 4, avec 2.3 m de distance entre les ouvertures, nous pouvons utiliser un abaque similaire à celui de la Figure 9 que nous avons produit pour le design guidelines de l'annexe 62 [6] et utiliser la formule correspondante dans le même document, ou utiliser le logiciel DIAL+, comme nous avons fait dans le tableau qui suit.



	Vf1	Vf2	Vf3	Vf4
				
$q_{5^{\circ}\text{C}}$ [m ³ /h]	202	410	676	1210
$q_{5^{\circ}\text{C}}$ [m ³ /m ² .h]	5.6	11.5	18.8	34.5
min pour* ren 50%	34	25	5	4
ratio /ref.	0.3	0.6	1	1.8

* temps nécessaire (en minutes) pour avoir un renouvellement de 50% de l'air avec un ΔT de 5°C entre l'air intérieur et l'air extérieur. Dans le cas d'un brassage parfait entre air neuf et l'air vicié

Tableau 21. Scénarios de disposition des fenêtres avec les débits d'air à 5°C ΔT avec l'air extérieur calculés avec le module « Ventilation Naturelle » du logiciel DIAL+.

Comme nous pouvons le voir sur le tableau ci-dessus, le débit d'air varie fortement en fonction de la disposition des fenêtres. Avec les mêmes surfaces (2 fenêtres de 1m² chacune, complètement ouvertes), nous pouvons obtenir 410 m³/h lorsque les fenêtres sont en largeur, 676 m³/h lorsqu'elles sont en hauteur ou 1210 m³/h lorsque les fenêtres sont séparées par une distance verticale de 2.3 m l'une de l'autre.

Nous avons indiqué pour chaque configuration le temps nécessaire pour renouveler 50% de l'air intérieur de l'espace. Cette information est importante pour le dimensionnement des fenêtres de locaux nécessitant une ventilation rapide comme, par exemple, les salles de classe ou les salles de conférence, qui doivent rester fermées pendant l'utilisation et qu'il faut ventiler rapidement pendant de courtes pauses.

On voit que les configurations Vf1 et Vf2 ne sont pas suffisantes pour évacuer les polluants pendant une pause de 15 minutes. Les mêmes ouvertures avec plus de hauteur permettent de renouveler 50% de l'air de l'espace en 5 et en 4 minutes (respectivement Vf3 et Vf4).

Les 6 scénarios de débit d'air

Vm $q_{\text{SIA2024}} \times 1$	Débit de ventilation selon SIA 2024, soit 2.6 m ³ /m ² h.
Vm $q_{\text{SIA2024}} \times 2$	Débit de sur-ventilation 2 X le débit SIA 2024, soit 5.2 m ³ /m ² h.
Vf1 ref X 0.3	Correspond à 15 cm en mode d'ouverture basculante selon Figure 10.
Vf2 ref X 0.6	2 ouvertures 1.6 largeur X 0.6 hauteur, disposées à la même hauteur
Vf3 ref X 1	2 ouvertures 0.6 largeur X 1.6 hauteur, disposées à la même hauteur
Vf4 ref X 1.8	2 ouvertures 1.6 largeur X 0.6 hauteur, disposées à 2.3 m de distance

Tableau 22 : 6 scénarios de variation du débit d'air et de la disposition des ouvertures



	Vm ×1	Vm ×2	Vf1 - 0.3	Vf2 - 0.6	Vf3 - 1.0	Vf4 - 1.8
$q_{5^{\circ}\text{C}}$ [m ³ /m ² .h]	2.6	5.2	5.6	11.5	18.8	34.5
V_j heures de surchauffe	902	565	189	69	40	26
V_n Heures de surchauffe	177	3	0	0	0	0
CRR V_j	0.00	0.73	0.53	0.67	0.73	0.78
CRR V_n	0.58	0.79	0.86	0.90	0.92	0.93

Tableau 23 : Indicateurs de confort et indicateurs énergétiques pour les 6 scénarios de débit d'air mécanique (les premiers deux Vm) ou naturel (les 4 suivants Vf1-Vf4)

Une analyse de ces résultats nous apprend que pour le local de référence, il n'est pas nécessaire d'avoir un débit de 10 m³/m²h pour apporter le confort par ventilation nocturne. Avec le double du débit hygiénique pour les bureaux cela est suffisant. L'optimisation de ce débit est importante, car un débit mécanique important consommerait beaucoup d'électricité et réduirait de SEER_{VC} et par conséquent le ADV_{VC} de la stratégie de ventilation.

Un dimensionnement des fenêtres pour des débits de l'ordre de 34 m³/m²h n'améliore pas beaucoup les performances énergétiques ou le confort de la stratégie de ventilation nocturne. Cette stratégie est même pénalisante car elle risque d'augmenter le nombre d'heures d'inconfort (matinées froides) si les ouvrants ne sont pas automatisés, et génère beaucoup d'ouvertures-fermetures en cas d'automatisation. Un fort débit par les fenêtres, améliore en revanche la stratégie de la ventilation du jour.

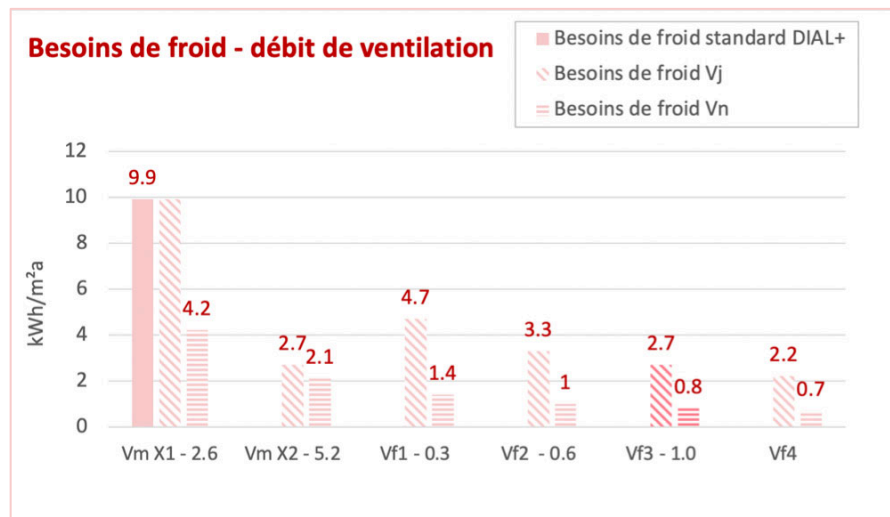


Figure 46 : Besoins de froid pour différents débit et disposition des ouvertures

En termes de besoins de froid, on voit sur le graphique ci-dessus que le débit hygiénique pour la ventilation nocturne n'est pas suffisant. Un débit double (5.2 m³/m²h) améliore le confort tant pour la ventilation de jour que pour la ventilation de nuit. L'optimisation de ce débit, doit en revanche prendre en compte les performances du système de ventilation mécanique, en calculant le SEER_{VC} et l'ADV_{VC} par rapport à un système de climatisation.



Pour les performances en ventilation naturelle, on voit qu'avec seulement 1.6 % de surface ouvrante (par rapport à la surface au sol), cela est suffisant pour la ventilation nocturne (scénario Vf1). En revanche, de plus grands degrés d'ouverture sont profitables pour la ventilation du jour ($\geq 5\%$).

Une bonne solution pourrait être de pouvoir les ouvrir manuellement à 100% en mode « battant » pendant le jour lorsque cela est nécessaire et, partiellement, en mode « oscillant » (manuellement ou automatiquement) pendant la nuit. Une autre solution très appréciée par les utilisateurs, est d'avoir un ouvrant manuel en partie basse pour l'ouvrir pendant le jour lorsque cela est souhaité, et un ouvrant automatique en partie haute pour la nuit. Ce système est aussi commode pour les questions de sécurité.

Influence du débit de ventilation mécanique.

- Le débit hygiénique de $2.6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ n'est suffisant ni pour la ventilation du jour, ni pour la ventilation de nuit, même s'il améliore la situation.
- Un débit double est suffisant ($5.2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$) mais le débit de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ suggéré par la norme SIA 180 est excessif.
- Lorsque ce système est choisi pour le refroidissement, il faut vérifier le SEER_{VC} pour avoir au moins une valeur >4 (un mauvais climatiseur split) et un $\text{ADV}_{\text{VC}} > 1$.
- Il faut optimiser le SEER_{VC} en optimisant la régulation du système pour avoir moins de 700 heures de surventilation nocturne (à priori 6 heures par nuit) et centrer les heures de fonctionnement autour de l'heure la plus froide de la nuit.
- Il faut vérifier que le régime de fonctionnement du système en mode sur-ventilation est sur une plage optimale par rapport aux pertes de charges et à la pression de fonctionnement du système.
- Dans le local de référence réel, nous avons observé un réchauffement de l'air de la ventilation double flux dans le réseau de distribution noyé dans la dalle, avec très faibles variations de température.

Influence du débit de ventilation naturelle.

- Une surface ouvrable $\sim 2\%$ de la surface au sol est suffisant pour la ventilation nocturne (une fenêtre de 1 m^2 ouvrant en oscillant pour 20 m^2 de surface de bureau).
- Une surface ouvrable $\sim 5\%$ de la surface au sol est optimale pour la ventilation pendant les heures d'utilisation (une fenêtre de 1 m^2 ouvrant complètement pour 20 m^2 de surface de bureau).
- Préférer les ouvertures en hauteur et éviter les ouvertures en largeur de faible hauteur.
- Si la trame architecturale des fenêtres impose des ouvertures en largeur de faible hauteur ($< 1 \text{ m}$), veiller à disposer deux fenêtres ouvrables avec au moins 1 m de distance entre elles en hauteur.

3.3.4 Impact de la capacité thermique

Le bureau de référence est réalisé avec une masse thermique moyenne selon la classification de la SIA 180. Cela correspond aux caractéristiques suivantes : sol en béton + chape sans revêtement avec résistance thermique, faux plafond et deux parois extérieures en béton (avec isolation extérieure) n'excédant pas 80% de la surface au sol.

**La capacité thermique selon SIA 180**

Capacité thermique élevée	Plancher ou plafond en béton apparent, + surfaces supplémentaires en béton qui totalisent au moins 80% de la surface de plancher. Les autres surfaces sont en cloisons légères ou faux plafonds – faux planchers.
Capacité thermique moyenne	Plafond en béton ou plancher avec au moins une chape minérale d'une épaisseur de 6cm, y compris le revêtement s'il est minéral et les autres parois en cloison légères avec une en construction en bois.
Capacité thermique faible	Construction légère (construction en bois, structure métallique) avec cloisons légères.

Tableau 24 : Capacité thermique selon la SIA 180.

	Capacité thermique importante	Capacité thermique moyenne (référence)	Capacité thermique moyenne-faible	Capacité thermique faible
Heures de surchauffe V_0	830	902	918	971
Heures de surchauffe V_j	11	40	81	187
Heures de surchauffe V_n	0	0	10	89
Heures de surchauffe V_m	110	177	303	514
Besoins de froid standard DIAL+	9.1	9.9	10.6	11.9
CRR V_j	0.76	0.73	0.67	0.56
CRR V_n	0.91	0.92	0.83	0.71
CRR V_m	0.85	0.78	0.66	0.45

Tableau 25 : Résultats des simulations des indicateurs de confort et des indicateurs d'énergie avec différents niveaux de capacité thermique.

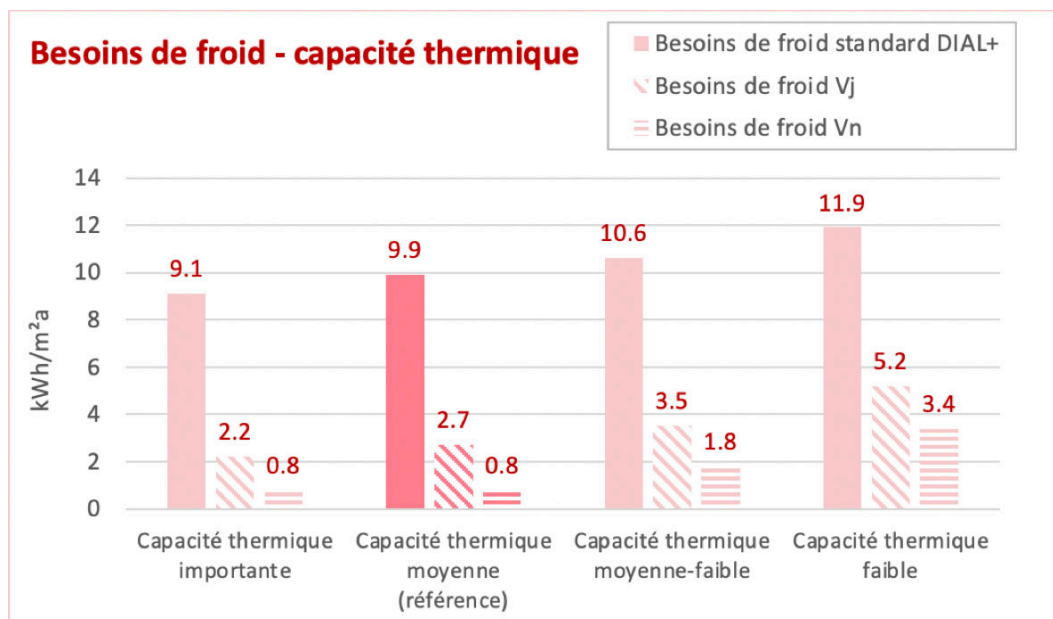


Figure 47 : Besoins de froid associés aux trois stratégies de ventilation en fonction des 4 niveaux de capacité thermique.

En analysant les résultats du tableau et du graphique, nous pouvons constater que l'impact de la masse thermique est assez particulier. Les besoins de froid n'augmentent pas de manière spectaculaire. Même pour le local avec capacité thermique faible ceux-ci n'augmentent que de 2 kWh/m²a (20%) par rapport au local de référence. Le local avec capacité thermique importante ne gagne que 0.8 kWh/m²a (soit - 8%). En revanche, l'efficacité de la stratégie de ventilation est plus affectée par la capacité thermique, surtout pour la capacité thermique faible. Nous pouvons le voir sur la variation du CRR, tant pour la ventilation de jour que pour la ventilation de nuit.

Il est aussi intéressant d'observer comment une faible capacité thermique affecte plus négativement l'efficacité de refroidissement d'une stratégie avec faible débit de ventilation (le CRR de la ventilation mécanique V_m).

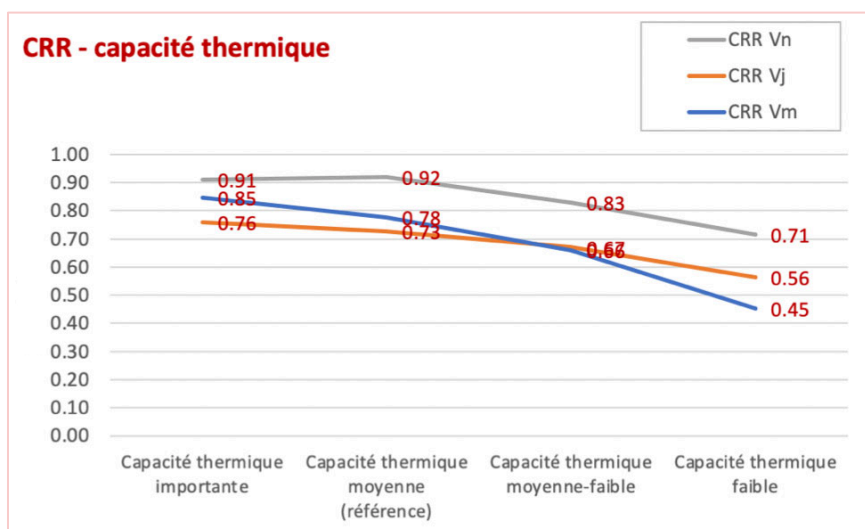


Figure 48 : CRR de trois stratégies de ventilation (Ventilation de nuit et de jour V_n, Ventilation du jour V_j et ventilation mécanique V_m) pour 4 niveaux de capacité thermiques.



L'impact de la capacité thermique sur l'efficacité de la ventilation est plus visible sur l'indicateur de confort. Le local avec masse thermique importante assure le confort quasiment constant (11 heures en dehors de la zone de confort) alors que le local avec capacité thermique faible présente 187 heures de surchauffe avec la même stratégie. Les locaux avec capacité thermique moyenne-faible et faible, n'assurent pas le confort avec les conditions normales même avec une ventilation nocturne.

Une masse thermique faible influence donc plus les températures extrêmes que le comportement moyen du local (besoins de froid sans stratégie de refroidissement par ventilation). Le faible effet de la masse thermique sur le comportement moyen et la plus forte sensibilité sur les conditions extrêmes a été observé aussi par d'autres auteurs [44] in [47]. Ce qui est intéressant à observer, est qu'une simple chape (capacité thermique moyenne-faible) suffit pour avoir un effet très significatif dans l'efficacité de la ventilation. Ceci est important pour les constructions en bois et autres constructions légères.

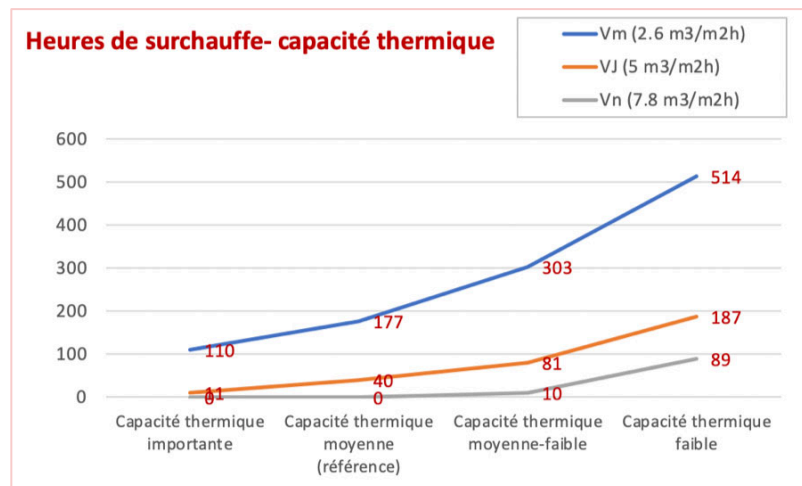


Figure 49 : Heures de surchauffe de 3 stratégies de refroidissement par ventilation pour 4 niveaux de capacité thermique.

Comme nous pouvons l'observer sur le graphique ci-dessus, un local à faible capacité thermique et vitré à 50% ne peut pas assurer le confort estival avec les conditions normales d'utilisation, même avec une ventilation nocturne (89 heures de surchauffe). Avec la ventilation diurne seulement, la situation est pire avec 187 heures de surchauffe, ce qui n'est pas acceptable. Comme nous le voyons sur le graphique, le local avec capacité thermique faible, devient très sensible à la chaleur. Cela vaut la peine d'explorer plus ce cas, avec plus et avec moins de gains solaires, et avec différents niveaux de faible masse thermique.

3.3.4.1 Comportement du local de référence avec faible capacité thermique

Pour ce cas spécifique, nous avons collaboré dans le cadre de ce projet avec le Smart Living Lab (SLL) de l'EPFL. Le SLL a réalisé un dispositif expérimental avec deux bureaux identiques, un avec très faible masse thermique (tous les murs et plafonds avec panneaux sandwich en bois avec 18 cm de polyuréthane comme isolation). Nous avons varié la masse thermique du sol avec une chape en ciment, et un mur avec de briques en terre crue compactée. Nous avons mesuré le comportement du local pour calibrer les paramètres du logiciel DIAL+, et par la suite nous avons simulé les mêmes stratégies de ventilation que pour cette analyse paramétrique et avec 5 variantes de faible masse thermique. Le local se trouve à Fribourg, avec une météo estivale moins chaude que Genève, et les protections solaires du local sont meilleures que les valeurs standard de SIA 2024. Les résultats détaillés de ces études sont publiés dans [45], [47]. Avec ces faibles améliorations des conditions standard (g du store, météo de



fribourg, facteur de forme du local avec plus de murs par m² au sol), le local expérimental avec faible masse thermique ne présente que 25 heures d'inconfort au lieu de 89 pour le local standard SIA 2024 situé à Genève. En ajoutant juste une chape en terre crue, ces heures d'inconfort sont réduites à 4. Cette sensibilité des locaux présentant une faible capacité thermique, souligne la nécessité d'une conception plus soignée, avec vérification des choix de la part vitrée, des propriétés des stores et de la masse thermique par simulation.

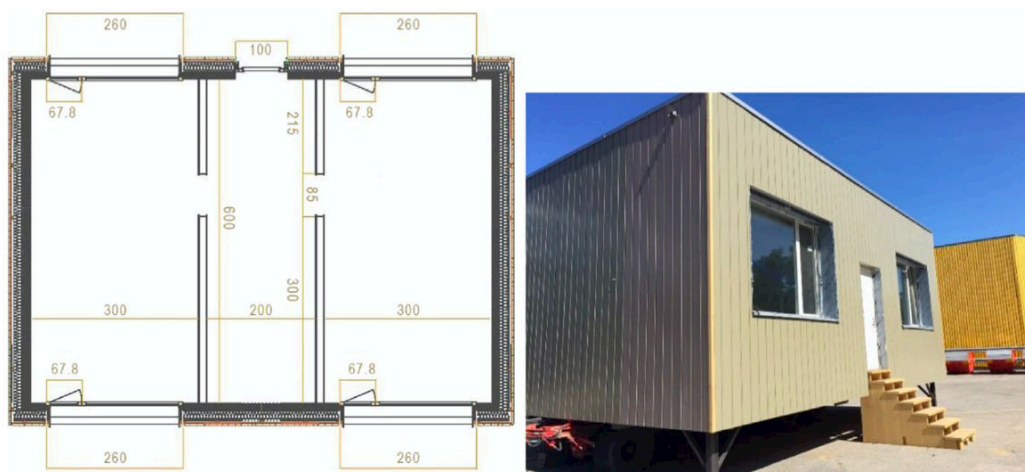


Figure 50 : Dispositif expérimental pour l'étude de la capacité thermique au Smart Living Lab. Un des 2 locaux dispose d'une capacité thermique faible et l'autre est équipé d'une chape en terre crue et/ou un mur en briques de terre crue.

Construction du local	Classification SIA 180	Heures de surchauffe	Température maximale[°C]
S1. Bois - Polyuréthane	Légère	25	31.3
S2. Bois + crépi	Légère	9	30.7
S3. Chape en ciment	Moyenne faible	4	30.1
S4. Briques en terre	Moyenne faible	0	28.7
S5. Chape et briques en terre	Moyenne	0	28.2
S6. Béton	Importante	0	26.9

Tableau 26 : Heures de surchauffe et température opérative maximale du local expérimental à Fribourg en fonction de sa capacité thermique.

Comme la capacité thermique influence moins le comportement thermique du bâtiment que les gains solaires ou internes, surtout avec une stratégie de ventilation naturelle efficace, le SLL s'est intéressé au bénéfice énergétique réel en tenant compte de l'énergie grise qui devient importante lorsque le béton est utilisé pour augmenter la capacité thermique. Comme les différences sont faibles entre capacité forte et capacité moyenne, l'impact environnemental (énergie primaire, CO₂ équivalent) du béton est plus grand que le bénéfice énergétique.



Les résultats des écobilans montrent donc que les capacités thermiques moyennes (S3, S4) autour de sont globalement les plus intéressantes, surtout si la masse thermique est constitué de matériaux naturels à faible impact carbone, et à faible énergie grise, comme c'est le case de la terre crue compactée [45][46][47].

3.3.4.2 Comportement d'un local en construction bois.

Vu l'importance des résultats de l'étude du paragraphe précédent et compte-tenu de la complexité et de la sensibilité du comportement dynamique d'un local léger, nous avons spécialement analysé le comportement d'un local en bois pour les conditions d'utilisation standard et le climat de Genève. Nous aimerions répondre aux questions suivantes :

1. Faut-il impérativement au moins une chape ou autre élément massif dans une construction en bois ?
2. Une construction optimisée en bois peut-elle tenir une vague de chaleur ou affronter le changement climatique ?

Afin de répondre à ces questions, nous avons poussé l'optimisation des autres paramètres sensibles autres que la masse thermique pour les variantes S1 et S3 du Tableau 26. Nous avons ainsi choisi :

- Un système d'éclairage plus performant avec 12 W/m^2 au lieu des 15.9 W/m^2 de la variante standard.
- Des couleurs très claires sur les parois, sols et plafonds, pour augmenter l'autonomie en éclairage naturel à 57% pour 500 lux, 76% pour 300 lux ou 81% pour 500 lux sur la zone d'utilisation principale (4 m de profondeur) (nous avons pris 76% d'autonomie dans le calcul).
- Des stores à lamelles très performants avec un coefficient g de 0.15 au lieu de 0.28 selon les conditions standard.
- Pour S3, nous avons créé une « optimisation 2 » en réduisant la surface vitrée à 30% au lieu de 50% du local de référence en plus des autres améliorations.

Cette dernière optimisation réduit les gains solaires, mais elle réduit aussi l'autonomie en éclairage naturel et donc augmente les gains internes. Selon une simulation avec DIAL+, l'autonomie moyenne pour un éclairage de 500 lux baisse de 57% à 37% et pour 300 lux de 76% à 64%. Si l'on considère l'autonomie à 500 lux sur la zone d'utilisation principale, nous passons de 81% à 53%. Nous avons pris une autonomie de 76% dans l'optimisation 1 et 53 % sur l'optimisation 2. Bien que les gains solaires soient inférieurs pour l'optimisation 2, les gains internes sont supérieurs avec une autonomie plus faible, ce qui donne des résultats mitigés.

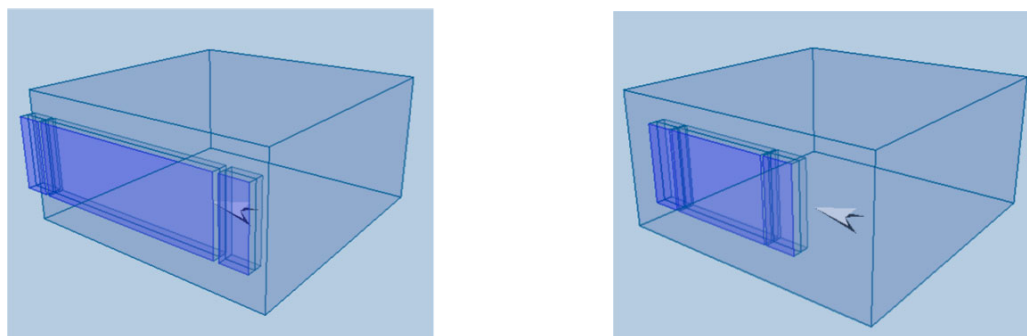
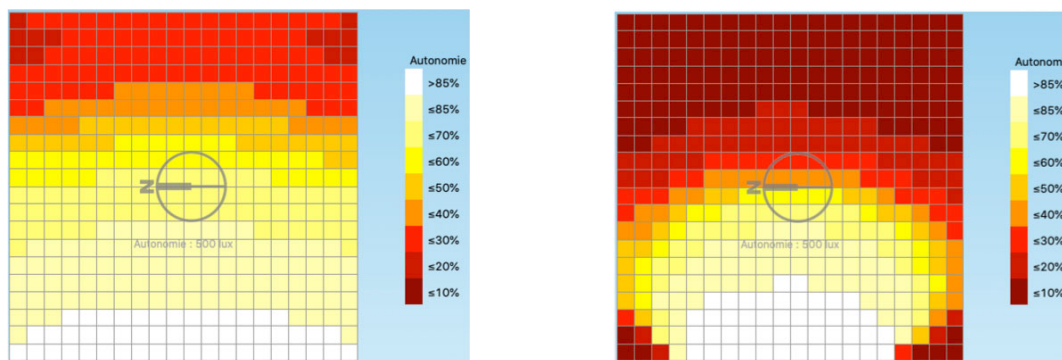


Figure 51 : vitrages du local de référence (et de l'optimisation 1) et de l'optimisation 2 avec la surface vitrée réduite à 30% de la façade au lieu de 50% du local de référence.



Autonomie optimisation 1
57% à 500 lux, 76% à 300 lux
81% à 500 lux zone 1

Autonomie optimisation 2
37% à 500 lux, 64% à 300 lux
53% à 500 lux zone 1

Figure 52 : Autonomie en éclairage naturel des deux locaux (simulation DIAL+)

	Capacité thermique moyenne (référence)	Capacité th. moyenne-faible - local optimisé	Capacité th. faible - local optimisé 1	Capacité th. faible - local optimisé 2	Capacité th. faible - local non optimisé
Heures de surchauffe* V_0	902	667	673	889	971
Heures de surchauffe* V_j	40	43	95	80	187
Heures de surchauffe* V_n	0	0	47	36	89
Heures de surchauffe* V_m	177	72	253	212	514
Besoins de froid standard	9.9	6.4	7.4	7.1	11.9
CRR V_j	0.73	0.67	0.58	0.61	0.56
CRR V_n	0.92	0.84	0.72	0.73	0.71
CRR V_m	0.78	0.70	0.49	0.54	0.45

Tableau 27 : Indicateurs de confort et énergétiques pour les locaux à faible capacité thermique optimisés.

Comme nous pouvons le voir sur le tableau, bien que les besoins de froid baissent drastiquement (6.4 à 7.4 kWh/m²a au lieu de 9.9 pour le local de référence), il y a encore des heures de surchauffe résiduelles, et même avec une ventilation nocturne, nous avons respectivement 47 et 36 heures hors zone de confort pour le local à faible capacité thermique optimisé. Il n'y a que le local avec chape (capacité thermique moyenne – faible) qui garantit le confort lorsqu'il est optimisé. Malheureusement l'optimisation 2, bien qu'elle réduise les gains solaires, augmente la consommation en électricité pour l'éclairage, donc cette optimisation n'est pas intéressante.

La réponse donc à la question 1 est que sans une chape ou un autre élément avec masse thermique, le confort sans refroidissement pour un bureau en bois avec construction en bois ou structure en métal est critique. Avec le faible nombre d'heures de surchauffe pour le local optimisé, il serait possible de garantir le confort avec un ventilateur plafonnier, ou avec un refroidissement géothermique de 10W/m² par le chauffage au sol sans machine de froid.

Nous avons simulé le local optimisé avec chape, et nous n'avons trouvé que 9 heures de surchauffe pendant les jours d'été les plus chauds. Comme nous pouvons le voir sur le diagramme du temps qui suit, ces quelques heures d'inconfort ont lieu en juin et en août qui correspondent à la météo de l'été 2003 selon le fichier max de Meteonorm. La réponse donc à la question 2 est oui.

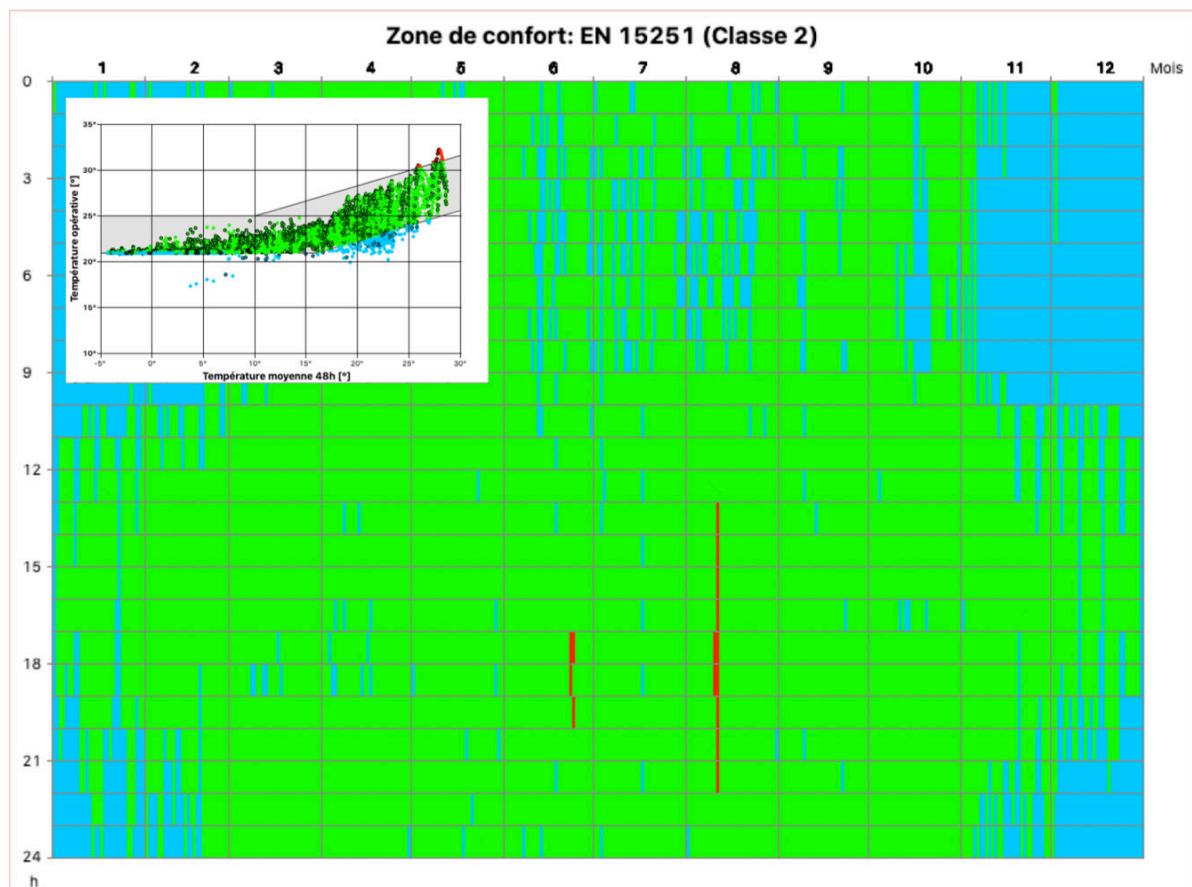


Figure 53 : Diagramme du temps pour un local construit en bois, situé à Genève, avec gains solaires optimisés et une chape au sol, pour une année avec fortes vagues de chaleur en juin, juillet et août (comme en 2003).

Un bâtiment qui résiste aux vagues de chaleur est aussi un bâtiment qui résistera au changement climatique, en tout cas jusqu'à 2060, comme nous l'avons vu sur les paragraphes précédents.



Une construction donc en bois, nécessite une attention particulière afin d'offrir un peu de masse thermique (une chape ou un mur en brique massive), de bons stores, mais sans réduire la proportion vitrée de la façade à moins de 50%.

En complément, nous avons simulé un local léger avec 84% de surface vitrée. Avec une ventilation nocturne le confort est à peine assuré (14 heures de surchauffe) pour une année moyenne, mais un local autant vitré et léger ne résisterait pas aux vagues de chaleur sans refroidissement supplémentaire. Les 43 heures de surchauffe apparaissent déjà au mois de mars avec une gestion parfaite du store, et deviennent 151 avec une gestion aléatoire.

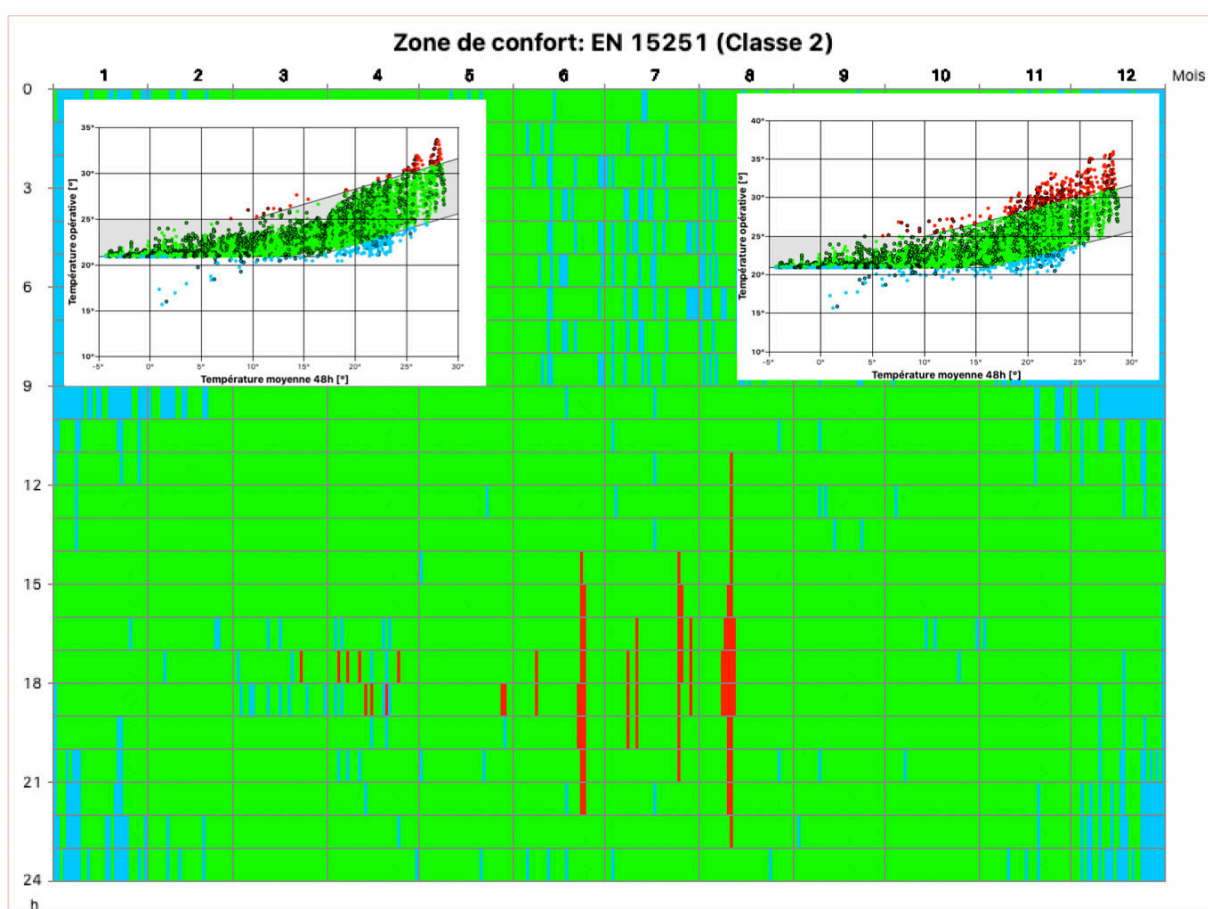


Figure 54 : diagramme du temps pour un local construit en bois, situé à Genève, 84% vitré, avec une chape au sol, pour une année avec fortes vagues de chaleur en juin, juillet et août (comme en 2003). En haut à droite le graphe de confort SIA 180 pour une gestion parfaite des stores (43 heures de surchauffe) et à gauche, avec une gestion aléatoire 151 heures de surchauffe.



Influence de la capacité thermique.

- L'influence de la capacité thermique est faible pour un local bien conçu du point de vue de la protection solaire, des gains internes raisonnables et ventilé intelligemment.
- L'influence est faible aussi pour les bâtiments refroidis mécaniquement
- La capacité thermique est importante pour les conditions extrêmes (pics de chaleur) où l'absence totale d'élément massif devient critique. Un local non optimisé sans masse thermique nécessite un refroidissement.
- Un bâtiment de bureaux en bois léger, peut offrir le confort sans climatisation, à condition de gérer parfaitement les stores, la ventilation nocturne et de garantir un élément de masse thermique moyenne (chape, ou mur en brique massive).
- Un bâtiment de bureaux en bois léger, peut offrir le confort avec un léger refroidissement par le sol avec 10 W/m^2 de froid géothermique ou en présence de ventilateurs plafonniers, puits canadien ou rafraîchissement adiabatique de 10 W/m^2 , à condition de gérer parfaitement les stores et la ventilation nocturne.
- Trop de masse thermique n'apporte pas une plus-value énergétique qui compense son énergie grise ou son impact CO_2 . Si elle est présente pour des raisons constructives, il faut la préserver, mais il n'est pas nécessaire de l'imposer pour les questions de confort ou d'énergie.
- Une masse thermique moyenne est un bon compromis entre l'énergie grise et le confort thermique estival.
- Une masse thermique faible est bon pour l'énergie grise mais l'absence totale de masse thermique rend le bâtiment sensible et nécessite une maîtrise parfaite de la régulation des stores et de la ventilation nocturne indispensable (ou de la climatisation)
- Cumuler une masse thermique faible (même avec chape et conception optimale) avec un fort taux de vitrage, rend le bâtiment sensible et la régulation ou les occupants n'ont pas droit à l'erreur.

:



4 Références

- [1] Asimakopoulos, D., Santamouris, M. (ed), *Passive Cooling of Buildings*, Routledge Chapman & Hall, 1996
- [2] Allard, F. (ed), Ghiaus, Ch. (ed), *Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design*, Earthscan, 2005
- [3] Maria Kolokotroni et al., *Ventilative Cooling, State-of-the-art review*, IEA EBC Annex 62, ISBN 87-91606-25-X, Aalborg University, 2018 (<https://venticool.eu/wp-content/uploads/2013/09/SOTAR-Annex-62-FINAL.pdf>)
- [4] Flourentzou, F., Bonvin, J., Pantet, S., *Ventilative cooling simulation for optimization and compliance control of nearly zero energy buildings*, 5th International Conference on Renewable Energy Sources & Energy Efficiency, [conference proceedings 529-538](#), Nicosia 2016.
- [5] Paul O'Sullivan, *Ventilative cooling Case Studies*, IEA EBC Annex 62, ISBN 87-91606-39-X, Aalborg University, 2018 (<https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Case-Studies-EBC-Annex-62-May-2018-Final.pdf>)
- [6] Per Heiselberg et al., *Ventilative Cooling design guidelines*, IEA EBC Annex 62, ISBN 87-91606-38-1, Aalborg University, 2018 (<https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Design-Guide-EBC-Annex-62-March-2018.pdf>)
- [7] Peter Holzer et al, *Ventilative Cooling Sourcebook*, IEA EBC Annex 62, ISBN 87-91606-37-3, Aalborg University, 2018 (<https://venticool.eu/wp-content/uploads/2016/11/VC-Sourcebook-EBC-Annex-62-March-2018.pdf>)
- [8] Christoffer Plesner et al., *Status and recommendations for better implementation of ventilative cooling in standards, legislation and compliance tools*, IEA EBC Annex 62, ISBN 87-91606-40-3, Aalborg University, 2018 (https://venticool.eu/wp-content/uploads/2018/10/Recommendations-Standards-IEA_Annex62-October-2018.pdf)
- [9] Artmann N., Manz H., & Heiselberg P. , *Passive Cooling of buildings by night-time ventilation*. Duebendorf: Schlussbericht. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK. Bundesamt für Energie BFE, 2008.
- [10] M. Kapsalaki, F. R. Carrión, *Overview of provisions for ventilative cooling within 8 European building energy performance regulations*, AIVC conference—Venticool platform, Madrid 2015.
- [11] Chiesa G, Grosso M. "Geo-climatic applicability of natural ventilative cooling in the Mediterranean area", *Energy and Buildings* 2015 107 pp376-391
- [12] Flourentzou F., Irwin D, Kritioti M, Stasis T, Zachopoulos N., *Hybrid ventilation and cooling technics for the new Nicosia Townhall*, AIVC conference, Copenhagen, 2012
- [13] Paule B., et al., *DIAL+Suite : a new suite of tools to optimize the global energy performance of room design*, Status Seminar, Zurich, 2012.
- [14] SN 520 380/1 *L'énergie thermique dans le bâtiment (thermal energy in buildings)*, SIA, Zurich, 2009.
- [15] SN 520 180, *Thermal protection, protection against humidity and thermal comfort in buildings*, SIA, Zurich, 2014
- [16] IEA-ECBCS Annex 62, Annex text, may 2013
- [17] IEA-ECBCS Annex 62, Annex on Ventilative Cooling, STA – Methods and tools: workplan, October 2014.
- [18] F. Flourentzou, *Règlement d'application de la Loi sur l'énergie du canton de Genève, propositions pour l'adaptation des articles concernant la climatisation*, Lausanne 2016, rapport interne confidentiel
- [19] F. Flourentzou, S. Pantet, K. Ritz, *Controlled natural and hybrid ventilation of school Gymnasiums*, *Journal of ventilation*, à paraître 2016 ou début 2017.
- [20] IEA-ECBCS Annex 62, status year reports, 2013-2016.
- [21] IEA-ECBCS Annex 62, meeting minuts, 2013-2016.
- [22] F. Flourentzou, *Recent developments with the Swiss Norms Concerning Cooling*, internal Report Annex 62, 2016.
- [23] F. Flourentzou, J. Bonvin *Key Performance Indicators, evaluated on the test case*, Annex 62 result presentation, Cork 2016
- [24] F. Flourentzou, J. Bonvin, *Energy performance Indicators for Ventilative Cooling*, AIVC conference, Nottingham 2017
- [25] Anette Michel, Eric Bush, Jürg Nipkow, Conrad U. Brunner, *Energy Efficient Room Air Conditioners—Best Available Technology*, EEDAL 2011



- [26] Commission Européenne, Règlement N 626/2011, Indication, par voie d'étiquetage, de la consommation d'énergie des climatiseurs, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0626&qid=1457358957299&from=EN>, 2011
- [27] Commission Européenne, Règlement N 206/2012 Exigences d'écoconception pour les climatiseurs, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0206&qid=1457359115778&from=EN>, 2012
- [28] PD O'Sullivan, M Kolokotroni, A field study of wind dominant single sided ventilation through a narrow slotted architectural louvre system, Energy and Buildings, 2017
- [29] I. E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, ISBN-10 : 8179921182. Jalco Publishing Edition 3rd ed., 2005
- [30] F. Flourentzou, J. van der Maas, and C.-A. Roulet, Experiments in Natural Ventilation for Passive Cooling, AIVC conference Gothenburg, 1996
- [31] T.R. Oke, The energetic basis of the urban heat island, Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, Vol 108, No. 455, 1982
- [32] H. Wanner, J.A. Hertig, Studies of Urban Climate and Air Pollution in Switzerland, Journal of applied meteorology, volume 23, 1984.
- [33] A. Wicki, E. Pavlow, C. Feignewinter, Evaluation and Modeling of Urban Heat Island Intensity in Basel, Switzerland, Climate 2018, 6, 55, mdpi.com, 2018.
- [34] Vincent Viguié, Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris, Environmental Research Letters, 2020.
- [35] Gehrig, R., König, N., Scherrer, S.: 2018, Städtische Wärmeinsel in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten, Fachbericht MeteoSchweiz, 273, 61 pp., 2018
- [36] Tsoka, S., Tolika, K., Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., & Bikas, D. A method to account for the urban microclimate on the creation of 'typical weather year' datasets for building energy simulation, using stochastically generated data. Energy and Buildings, 165, 270-283, 2018
- [37] Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. Energy and Buildings, 156, 96-10, 2017.
- [38] Grize, L. et Al, Heat wave 2003 and mortality in Switzerland, Swiss med WKLY, 135, 200-205, 2005.
- [39] Tsoka, S., Urban microclimate analysis and its effect on the buildings energy performance, PhD Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, School of Engeneering department of Civil Engineenring, Laboratory of Building Construction and Building Physics, 2019.
- [40] Fischer, A., Strassmann, K., CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, 271 pp., ISBN: 978-3-9525031-4-0, Zurich, 2018.
- [41] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/fr/spmsspm-6.html
- [42] Office Fédéral de L'énergie OFEN. Performance Globale en Éclairage—Global Lighting Performance; Final Report; Office Fédéral de L'énergie OFEN: Bern, Switzerland, 2014
- [43] Paule, P., Boutillier, J., Pantet, S., Shading device control, effective impact on daylight contribution, Cisbat conference, Lausanne, 2015.
- [44] Wang, L.S.; Ma, P.; Hu, E.; Giza-Sisson, D.; Mueller, G.; Guo, N. A study of building envelope and thermal mass requirements for achieving thermal autonomy in an office building. Energy Build. 2014, 78, 79–88.
- [45] Brambilla, A.; Jusselme, T. Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype. Energy Build. 2017, 156, 281–292
- [46] Brambilla, A.; Bonvin, J.; Flourentzou, F.; Jusselme, T. Life cycle efficiency ratio: A new performance indicator for a life cycle driven approach to evaluate the potential of ventilative cooling and thermal inertia. Energy Build. 2018, 163, 22–33
- [47] Brambilla, A., Bonvin, J., Flourentzou, F., Jusselme, Th., On the Influence of Thermal Mass and Natural Ventilation on Overheating Risk in Offices, Buildings, 2018, 8, 47, <https://www.mdpi.com/2075-5309/8/4/47>, 2018.
- [48] Flourentzos, F., Pantet, S., Ritz, K., Controlled natural and hybrid ventilation of school Gymnasiums, International Conference on Advanced Building Skins, Bern, Switzerland, 2015.



Sommaire

Objectifs	4
Résumé 4	
1 État de l'art	5
1.1 État de la recherche	6
1.2 Conclusion	8
2 Indicateurs clé et modèles.....	11
2.1 Bâtiment de référence	11
2.2 Modèles d'évaluation et conditions aux limites.....	13
2.2.1 Comparaison des logiciels Energy Plus, TRNSYS, BSim et Dial+	13
2.2.2 Comparaison des logiciels DIAL+, LESOSAI, SIA TEC-Tool	15
2.2.3 Discussion sur la comparaison des logiciels	19
2.3 Stratégies de ventilation pour refroidir.....	20
2.3.1 Ventilation de jour ou ventilation nocturne.....	20
2.3.2 Mécanique ou naturelle ?	22
2.3.3 Ventilation manuelle ou automatique	22
2.3.4 Stratégies standardisées à analyser	22
2.4 Indicateurs de performance.....	23
2.4.1 Indicateurs de confort	24
2.4.2 Indicateurs de performance énergétique.....	24
2.4.3 Indicateurs des valeurs aux limites et indicateurs de composant.....	32
2.4.4 Indicateurs de sensibilité	42
2.5 Performances du rafraichissement par ventilation mécanique à la lumière des indicateurs de performance	44
2.5.1 Optimisation du fonctionnement sur horaire.....	44
2.5.2 Régulation sur conditions de température	46
2.5.3 Ventilation naturelle ou mécanique ? horaire ou sur température ?	46
2.5.4 Performance des ventilateurs plafonniers	48
3 Étude paramétrique de refroidissement par ventilation	49
3.1 Indicateurs de confort et CRR pour les affectations bureau, salle d'école et logement collectif.....	50
3.2 Influence du climat et du microclimat	51
3.2.1 Effet du climat en Suisse	51
3.2.2 Effet du microclimat	53
3.2.3 Les vagues de chaleur	57
3.2.4 Effets de l'environnement proche du bâtiment	60



3.2.5	Effet du changement climatique	65
3.3	Impact de paramètres de conception	68
3.3.1	Impact des gains solaires (part vitrée et efficacité de la gestion des stores)	68
3.3.2	Impact des gains internes.....	73
3.3.3	Impact du débit de ventilation.....	76
3.3.4	Impact de la capacité thermique.....	80
4	Références	90
	Sommaire	92
	Liste des abréviations	94



Liste des abréviations

OCEN	Office Cantonal de l'Énergie – Genève
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
SIA	Société de Ingénieurs et Architectes suisses
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
CRR	Cooling Requirement Reduction
SEER _{vc}	Seasonal Energy Efficiency Ratio of Ventilative Cooling
EFF _{AC}	Air Conditionning Efficiency of ventilative cooling
SPI	Ventilation Specific Power Input [W/m ³ /h]
SFP	Spécific Fan Power [W/m ³ /h]
C _d	Coefficient de décharge
IP	Indicateurs de Performance
SLL	Smart Living Lab (EPFL)
MOPEC	Modèle de Prescriptions Energétique Cantonales
PAC	Pompe à Chaleur.